

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Інженерно-хімічний факультет

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра автоматизації хімічних виробництв

(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри
_____ А.І.Жученко
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ____ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності **151 – Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології**
(код і назва)

на тему: Автоматизація процесів керування графітування вуглецевих виробів

Виконав (-ла): студент (-ка) 6 курсу, групи ЛА-61м
(шифр групи)

Волощук Марія Григорівна

(прізвище, ім’я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник зав. кафедри, д.т.н., проф. Жученко А. І.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2018 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Інженерно-хімічний факультет

(повна назва)

Кафедра автоматизації хімічних виробництв

(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 151- Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ А.І.Жученко
(підпис) (ініціали, прізвище)

«26» _____ 03 _____ 2018р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Волощук Марії Григорівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Автоматизація процесів керування графітування вуглецевих виробів _____,

науковий керівник дисертації Жученко А. І., д.т.н., проф.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «21» 03 2018 р. № 979-с

2. Термін подання студентом дисертації 18 травня 2018 р.

3. Об'єкт дослідження Процес графітування вуглецевих виробів

4. Предмет дослідження Автоматизація процесів керування графітування вуглецевих виробів _____

5. Перелік завдань, які потрібно розробити аналіз процесу графітування як об'єкту автоматичного керування; математичне моделювання процесу графітування; дослідження температурного режиму процесу графітування; побудова спрощеної математичної моделі процесу графітування вуглецевих виробів та її дослідження; синтез системи керування процесом графітування вуглецевих виробів; стартап-проект.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу матеріали презентації до захисту магістерської дисертації _____

7. Орієнтовний перелік публікацій подані заявки на патенти: заяв. на корисну модель U2018 03181 від 27.03.18 «Спосіб графітування вуглецевих виробів»; заяв. на корисну модель U2018 04008 від 13.04.18 «Спосіб графітування вуглецевих виробів»; тези доповідей: «Оптимізація роботи вуглеграфітового виробництва за критерієм рентабельності» Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології [текст]: матеріали Третьої міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ-2016); Київ, НТУУ «КПІ», 20-21 квітня 2016 р. К. : НТУУ «КПІ», 2016. – 138 с. : іл. С. 24-26; «Обґрунтування доцільності використання спрощеної математичної моделі процесу графітування вуглецевих електродів» Матеріали III Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами», 23 листопада 2016 р. [Електронний ресурс] – К: НУХТ, 2016 р. – 286 с. — Режим доступу: <http://nuft.edu.ua/page/view/konferentsii> С. 36-37; «Постановка задачі керування процесом графітування вуглецевих електродів» Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології [текст]: Матеріали Четвертої Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ-2017), Київ, 19-20 квітня 2017р. КПІ ім. Ігоря Сікорського, Політехніка. С. 81-82 Режим доступу: <http://nuft.edu.ua/page/51adaed39c2a2/files/CMIP2017.pdf>; «Математичне моделювання процесу графітування вуглецевих виробів» Інформаційні технології та ком'ютерне моделювання . Матеріали статей Міжнародної науково-практичної конференції, м. Івано-Франківськ, 15-20 травня 2017р., - 464стр. С. 315-318; «Розроблення структури системи керування режимом розігріву процесу графітування вуглецевих виробів» IV Міжнародна науково-технічна Internet-конференція «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами», 22 листопада, Київ, НУХТ; **статті:** «Спрощена математична модель процесу графітування вуглецевих виробів», вісник НТУУ "Київський політехнічний інститут". Серія: "Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження"; «Дослідження температурних полів процесу графітування вуглецевих виробів», журнал

«Автоматизація технологічних і бізнес-процесів»,

Vol.11

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання 29.03.2018 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Опис технологічного процесу та об'єкта керування	04.04.2018	
2	Математичне моделювання процесу графітування вуглецевих виробів	12.04.2018	
3	Дослідження температурних режимів процесу графітування	17.04.2018	
4	Побудова спрощеної математичної моделі процесу, синтез системи керування	27.04.2018	
5	Розробка стартап-проекту	04.05.2018	
6	Оформлення матеріалів до магістерської дисертації	18.05.2018	

Студент

(підпис)

М. Г. Волощук
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

А. І. Жученко
(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація містить дослідження процесу графітування вуглецевих виробів, його математичне моделювання, дослідження температурних режимів процесу, побудову спрощеної математичної моделі та синтез системи керування процесом графітування вуглецевих виробів, та оформлена у записку об'ємом 121 сторінка. Пояснювальна записка містить 46 рисунків, 13 таблиць, 68 літературних джерел.

У магістерській дисертації об'єктом дослідження є процес графітування вуглецевих виробів. Предметом дослідження є математична модель, температурні режими, спрощена математична модель процесу графітування вуглецевих виробів та синтез системи керування процесом.

У магістерській дисертації досліджено технологічний процесу графітування вуглецевих виробів, проведено математичне моделювання процесу, досліджено температурні режими, побудовано спрощену математичну модель процесу.

У магістерській дисертації розроблено алгоритм керування процесом графітування вуглецевих виробів в умовах штатного і нештатного режимів роботи, що дозволить зменшити енерговитрати виробництва.

Також в магістерській дисертації було розроблено стартап-ідею щодо зменшення енерговитрат процесу графітування вуглецевих виробів шляхом визначеного способу ведення процесу.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: графітування, спосіб графітування, ступінь графітування, піч Ачесона, вуглецеві вироби, математична модель, спрощена математична модель, температурні поля, алгоритм керування.

Abstract

The master's dissertation contains the study of the process of grafitization carbon products, its mathematical modeling, the study of the temperature modes of the process, the construction of a simplified mathematical model and the synthesis of the control system of the grafitization process of carbon products, and is drawn up in a note of 121 pages. The explanatory note contains 46 figures, 13 tables, and 68 literary sources.

In the master's thesis, the object of research is the process of grafitization carbon products. The subject of the study is a mathematical model, temperature modes, a simplified mathematical model of the process of grafitization carbon products and the synthesis of process control system.

In the master's thesis the technological process of grafitization carbon products is studied, the mathematical modeling of the process is carried out, the temperature regimes have been studied, the simplified mathematical model of the process has been constructed.

In the master's thesis an algorithm for controlling the process of grafitization of carbon products in the conditions of full-time and non-standard operating modes, which will reduce the energy consumption of production, is developed.

Also in the master's dissertation was developed the start-up idea of reducing the energy consumption of the process of graphic carbon products by a specific method of conducting the process.

KEYWORDS: grafitization, grafitizing method, degree of grafitization, Acheson's furnace, carbon products, mathematical model, simplified mathematical model, temperature fields, control algorithm.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

β, γ – ступінь графітування;

τ – час, с;

T – температура процесу, °С;

K – константа швидкості процесу графітування, с^{-1} ;

B – енергія активації процесу графітування, Дж/моль;

L – довжина заготовок, м;

H – ентальпія, в якій враховується теплота випаровування чи конденсації
вологи у вологовмістних матеріалах печі.

Зміст

Вступ	16
-------------	----

1. Аналіз процесу графітування як об'єкту автоматичного керування	18
1.1. Структура і властивості графіту	18
1.2. Показники процесу графітування та характеристики якості електродних виробів	21
1.3. Опис технологічного процесу виробництва вуглецевих виробів.....	26
1.4. Характеристика печі графітування.....	40
1.5. Постановка задачі.....	44
2. Математичне моделювання процесу графітування.....	46
2.1. Аналіз існуючих моделей процесу графітування в печах Ачесона.....	46
2.2. Математична модель процесу графітування вуглецевих виробів	51
3. Дослідження температурного режиму процесу графітування	68
3.1. Режим нагрівання	68
3.2. Режим охолодження.....	80
4. Побудова спрощеної математичної моделі процесу графітування вуглецевих виробів та її дослідження	90
4.1. Обґрунтування необхідності спрощення математичної моделі	90
4.2. Аналіз методів спрощення математичних моделей.....	92
4.3. Дослідження валідності спрощеної моделі процесу графітування	94
5. Синтез системи керування процесом графітування вуглецевих виробів	103
5.1. Аналіз існуючих систем керування процесом графітування вуглецевих заготовок.....	103
5.2. Алгоритм керування процесом графітування вуглецевих виробів	106
6. Стартап-проект	112
6.1. Опис ідеї стартап-проекту	112
6.2. Аналіз зовнішнього маркетингового середовища.....	115
6.3. Загальний аналіз стартап-ідеї.....	118
Висновки.....	121
Список використаної літератури.....	123

Вступ

Виробництво графіту є дуже енергоємним. З [1] відомо, що питома кількість електроенергії, підведеної до печі Ачесона за період кампанії графітування, становить близько 6500 кВт·год/т. Тому зменшення витрат на кампанію графітування у сучасних економічних умовах є важливою науково-практичною задачею.

Особлива увага при виробництві електродних виробів з підвищеними експлуатаційними характеристиками приділяється забезпеченню однорідності їх фізичних властивостей.

На процес графітування впливає цілий ряд факторів, зокрема, індивідуальні властивості вуглецевих матеріалів, газове середовище, передісторія термічної обробки, тривалість процесу, температура тощо. Вплив декотрих із них на процес графітування наразі до кінця не досліджений. Однак, як показують численні дослідження [2 – 5], головним чинником, який визначає якість графітування вуглецевої речовини є кінцева температура. Причому для отримання якісного штучного графіту кінцева температура обробки повинна бути не нижче 2000 – 3000°C.

Графітування вуглецевих виробів, до яких відносяться електроди дугових сталеплавильних печей, подові блоки алюмінієвих електролізерів тощо, як правило, здійснюється в електричних печах опору по технології Ачесона [6]. Печі Ачесона характеризуються істотною нерівномірністю розподілу температурного поля та нестабільністю електро- та теплофізичних властивостей матеріалів завантаження. При швидкому нагріванні печі збільшується нерівномірність температурного поля і, як наслідок, зростає термонапруження у виробах, що може призвести до браку продукції. У виробничих умовах з метою запобігання випуску бракованої продукції здійснюється опосередковане оцінювання термопружного стану виробів, що призводить до перевитрат електроенергії, а значить, до зниження ефективності виробництва.

Ще одним чинником перевитрат енергоресурсів є неточне визначення тривалості кампанії графітування, яка для гарантованого забезпечення нормативної

якості готової продукції триває довше, ніж потрібно. Тому задача підвищення ефективності процесу графітування у виробництві вуглецевих виробів є актуальною науково-технічною задачею особливо в сучасних умовах постійного зростання вартості енергоносіїв.

Метою даної роботи є ознайомлення з власне процесом графітування, огляд існуючих математичних моделей процесу графітування вуглецевих виробів, дослідження температурного режиму процесу графітування, розробка і дослідження спрощеної математичної моделі процесу графітування вуглецевих виробів, використання якої в подальших дослідженнях дозволить в найкоротші терміни і з мінімальними матеріальними витратами, виконати оцінку механічного і енергетичного стану печей графітування при різноманітних наперед завданих характеристиках технологічного регламенту, та синтез системи керування процесом графітування вуглецевих виробів, що забезпечить випуск готової продукції заданої якості при функціонуванні процесу графітування у режимі ресурсо- та енергозбереження з урахуванням можливих непередбачуваних відключень енергоживлення.

1. Аналіз процесу графітування як об'єкту автоматичного керування

1.1. Структура і властивості графіту

Унікальні фізико-хімічні властивості графіту, такі як висока термостійкість і електропровідність, хімічна інертність та механічна міцність, суттєва антикорозійність і антифрикційність [6, 7, 8, 9], визначили його широке застосування у різних галузях промислового виробництва: чорна і кольорова металургія, атомна та електротехнічна промисловість, електротермія - електроди дугових сталеплавильних печей та печей переплаву кольорових металів, конструкційно-футерувальні матеріали доменних і феросплавних печей, аноди і катоди алюмінієвих та магнієвих електролізерів, тиглі, нагрівники та форми для виробництва кремнію і германію, різноманітного типу електрохімічні генератори та ін.

Графіт представляє собою кристалічну модифікацію вуглецю і переважно має гексагональну структуру. Атоми у гексагональній структурі графіту розміщені паралельними шарами і у кожній площині утворюють сітку із правильних шестикутників з відстанню між атомами $1,415 \text{ \AA}$ [10]. Відстань між шарами у структурі графіту дорівнює $3,354 \text{ \AA}$ і вони зміщені один відносно другого на величину відстані між атомами у шарі. Енергія зв'язку між атомами вуглецю у шарі становить порядку 250-350 кДж/моль, енергія зв'язку атомних шарів приблизно у 10 разів менша і становить 26-38 кДж/моль [11, 12].

Структура графіту визначає його основні властивості. Тому графіт відрізняється такими фізичними властивостями:

- невеликою густиною – $1700 - 2200 \text{ кг/м}^3$;
- значною анізотропією відповідно до кристалічної решітки з коефіцієнтом анізотропії для монокристалів більш ніж 5;
- значною хімічною інертністю;

- гарними антифрикційними властивостями з коефіцієнтом тертя по металу 0,03-0,05 при робочій швидкості до 10 м/с;
- великим значенням електро- і теплопровідності в напрямку паралельному базисній площині;
- зростанням міцності зі збільшенням температури. Так межа міцності на розтяг з підвищенням температури збільшується у 1,5 – 2,5 рази, досягаючи свого максимуму при 2400 – 2800 °С; межа міцності на стискання збільшується у 1,3 – 1,6 рази в інтервалі 2200 – 2300 °С, модулі пружності та зсуву зростають у 1,3 – 1,6 рази в інтервалі 1600 – 2200 °С. З підвищенням температури до 3000°С і вище механічна міцність доволі різко знижується і при 3200°С наближається до властивостей при 20 °С;
- крихкістю в інтервалі температур 20 – 2000°С;
- великою магнітною сприйнятливістю у напрямку перпендикулярному базисним площинам та незначною у паралельному, тобто графіт є діамагнетиком.

Основними складовими при виробництві штучного графіту, як було зазначено вище, є наповнювач – кокс (нафтовий, пековий кам'яновугільний та ін.), антрацит і термоантрацит; сполучне кам'яновугільні пеки (м'який, середньо температурний та низькотемпературний), які відрізняються температурами розм'якшення. У нафтових коксах міститься 90-98% вуглецю, а у пековому – 96,5 – 97,5%. Застосування коксу голчастої структури при виготовленні графітових електродів підвищує їх якість. Наприклад, при їх використанні у електротермічних печах голчастий кокс сприяє підвищенню густини електричного струму. Основною функцією сполучного є придання зв'язаності і пластичності електродній масі при формуванні заготовок [13].

З літературних джерел відомо [2, 14 – 17], що на якість кінцевого продукту – електродних виробів значно впливає вибір наповнювача і сполучного та дотримання технологічної карти підготовки «зелених» заготовок до графітування.

Зі структурної точки зору, процес графітування, який протікає при високих температурах, викликає взаємне переміщення гексагональних шарів, яке

супроводжується зменшенням міжшарової відстані від 3,425 Å (неупорядкована, турбостатна структура) до 3,354 Å (структура ідеального графіту).

На практиці в процесі графітування неможливо отримати графіт з ідеальною структурою, тому що частина речовини лишається в турбостатному, неупорядкованому стані. Для оцінки ступеня графітування або ступеня тривимірного упорядкування матеріалу використовують наступне співвідношення:

$$\gamma = \frac{0,3425 - \bar{d}/2}{0,3425 - 0,3354},$$

де 0,3425 – міжшарова відстань речовини з повністю неупорядкованою структурою нм; 0,3354 – міжшарова відстань ідеального графітового монокристалу, нм; $\bar{d}/2$ – середня міжшарова відстань дослідного матеріалу, нм.

Середня міжшарова відстань визначається рентгенографічним аналізом за допомогою дифрактометра. Якщо скористуватись припущенням *R.E. Franklin* [3], що сусідні шари вуглецевих сіток можуть знаходитись тільки в крайніх положеннях, тобто або в орієнтованих шарах на відстані 0,354 нм, або при відсутності взаємної орієнтації на відстані 0,344 нм, то зв'язок між середньою міжшаровою відстанню і часткою речовини, яка лишилася у турбостатному стані можна описати наступною залежністю, отриманою *G.E. Bacon* [18]:

$$\bar{d}/2 = 0,344 - 0,086(1 - \rho) - 0,0064\rho(1 - \rho),$$

де ρ – частка шарів, що знаходяться у турбостатному стані; 0,0086 – різниця між міжшаровими відстанями 0,344 і 0,3354 нм.

На ступінь графітування впливає безліч факторів: температура процесу, час витримки, склад газової фази, вихідна сировина та її підготовка та інше, але найбільше всього впливає температура процесу та часу витримки:

$$\gamma = 1 - \exp(-K\tau),$$

де τ – час, с; K – константа швидкості процесу графітування, с⁻¹.

Константа швидкості процесу графітування також залежить від температури і визначається на базі рівняння:

$$K = A \exp\left(-\frac{B}{RT}\right),$$

де T – температура процесу, К; $R=8,31441$ Дж/(моль·К) – газова постійна; A – константа рівняння, с^{-1} ; B – енергія активації процесу графітування, Дж/моль. Коефіцієнти A і B залежать від виду вихідного матеріалу[19].

1.2. Показники процесу графітування та характеристики якості електродних виробів

До основних показників процесу графітування відносять дві групи показників: технологічні й режимні. Технологічні показники включають схему укладання керна, типи та розміри печей, перетин та довжину виробів, що графітуються, пересип очні та теплоізоляційні матеріали. До режимних параметрів відносяться температурні та енергетичні, які є тісно пов'язані між собою.

Основні характеристики температурного режиму процесу графітування включають: максимальну температуру у керні; час витримки керна при максимальній температурі; темп нагрівання заготовок; перепад температури у заготовках та ін. Енергетичний режим є визначальним фактором температурного режиму процесу графітування, який значно залежить від властивостей керованої пересипки і геометрії керна та характеризується регламентом підводу потужності у піч, терміном кампанії графітування питомими витратами електроенергії.

Процес графітування виробів є надзвичайно енергоємним. Теоретичні витрати електроенергії на графітування електродних заготовок, тобто на їх нагрів до $2750\text{ }^{\circ}\text{C}$, дорівнюють $1800\text{ кВт}\cdot\text{год/т}$, а фактичні – на печах Ачесона становлять $4000\text{--}5000\text{ кВт}\cdot\text{год/т}$ (до $6500\text{ кВт}\cdot\text{год/т}$ при графітуванні особливо якісних виробів)[6]. Таким чином понад 60% становлять теплові втрати у довкілля[20]. На печах Кастнера ПВЕ значно менші і становлять $3000\text{--}3500\text{ кВт}\cdot\text{год/т}$. Тривалість процесу графітування в печах Ачесона – від 36 до 120 годин, а в печах Кастнера – від 10 до 30 годин.

Таким чином, виходячи з ПВЕ печі Ачесона, витікає необхідність зменшення тепловитрат при графітування, наприклад, за рахунок зменшення тривалості процесу. Проте на шляху до прискорення процесу можуть стояти такі дві суттєві

перешкоди: 1) збільшення ймовірності розтріскування вуглецевих заготовок при прискореному нагріванні; 2) недостатня потужність пічних трансформаторів.

З метою зменшення ймовірності розтріскування заготовок у працях [5, 20, 21] рекомендується процес нагрівання заготовок у печі графітування розбити на три періоди: у першому при значній потужності здійснюється швидкий підйом температури до 1000 °C; у другому (інтервал температур 1000 – 2000 °C) – рівень підводу потужності зберігається незмінним або навіть дещо знижується; у третьому – різко збільшується підвід питомої потужності до 150 – 170 кВт/т. Запропонований графік дозволяє скоротити загальний час її нагрівання, зменшити витрати електроенергії та підвищити оборотність печі.

Одним із важливих чинників, які впливають на показники графітування є операція завантаження. Робочий об'єм печі повинен бути заповнений керном таким чином, щоб його електричний опір був однаковим по усьому перетину. Це забезпечить рівномірність розподілу струму по всьому перетину і, відповідне, рівномірне нагрівання керна. Нерівномірна укладка керна призводить до значних перекосів у розподілі струму особливо при високих температурах [13].

Несиметричність укладання керна печі призводить у результаті при здійсненні процесу графітування до значної різниці температур між центром та периферією порядку 300 – 400 °C, а іноді і до 1000 °C. Подібна різниця температур на різних ділянках зберігається практично на протязі усієї кампанії графітування, незалежно від її тривалості.

Дослідження [22] показали, що щільність укладання заготовок впливає на розподіл температури по периметру печі: при абсолютно щільному укладанні температура більш рівномірна. При цьому температура уверху печі відрізняється від температури центра керна на більше ніж на 10%. При існуючій раніше практиці укладання керна температура верху становила біля 60 – 65% від температури центру керна.

У розглянутій науковій праці [23] запропоновано комбіновану схему завантаження керна, яка полягає у чергуванні при укладанні великих та малих заготовок. Така схема на думку авторів [23] дозволяє одночасно зменшити відносну

різницю у електричному опорі самої великої заготовки і проміжну між заготовками, створити більш рівномірний розподіл струму у перерізі керна і, відповідно, зменшити температурні перепади.

Автор ж іншої праці [24], аналізуючи способи компоновки керна у печах Ачесона вказує на те, що існуючий спосіб укладання поперек печі придатний не для всіх марок графіту в заготовках великого перетину. Тому було запропоновано повздовжнє розташування заготовок у керні. Відмічено, що при поперечному розташуванні заготовок на бічних поверхнях опір мінімальний у центрі заготовки, де і виділяється максимальна кількість теплоти і, відповідно, досягається максимальна температура. По поперечному перетину заготовки створюється температурне поле з локальними більш високими градієнтами температури.

Нову схему завантаження печі запропонували та випробували на промисловій печі автори винаходу [25]. У периферійній зони керна (верх і низ) укладаються у два ряди заготовки діаметром 300 мм, а у центральну зону керна – заготовки діаметром 100; 125 та 150 мм. У результаті вихід заготовок малого перерізу вищого сорту збільшився на 14 – 16%.

Сутність розробленого у [24] способу полягає у тому, що при укладанні керна довгими заготовками ($L > 0,7$ м) вони укладаються у окремі пучки поздовжньо з відстанню між торцями не більше $0,1 L$. При цьому загальна довжина прошарків керової пересипки буде менше ніж $0,1$ від довжини керна. Це приводить до зменшення електричного опору кожної свічки і перерозподілу теплоти, що виділяється у керовому прошарку та заготовках. Широкий діапазон зміни відстані між торцями $\delta = 0,01 - 0,1 L$ дозволяє працювати як у області методу Ачесона $\delta \approx 0,1 L$, так і у області методу Кастнера $\delta \approx 0,1 L$.

У [26] на підставі аналізу даних з технічного оснащення переділу графітування відпрацьовані рекомендації з модернізації існуючих та проектуванні нових печей типу Ачесона. Наприклад, раціональна довжина печей Ачесона 16 – 20 м, ширина та висота біля 3,5 м, потужність електричного живлення повинна забезпечити силу струму до 200 кА і рівномірне розташування струмовідводів по перетину торця печі.

Суттєвий вплив на показники графітування надають допоміжні матеріали – пересипка і теплоізоляційна шихта. Пересипка визначає теплоелектричний режим печі графітування. Дослідження температурного поля математичної моделі показали, що розподіл джоулевої теплоти по перетину керна визначається характером кривої температурної залежності ПВО пересипки та якістю теплоізоляції. Наприклад, для матеріалів зі значною залежністю ПВО від температури (антрацит, сирий кокс) перепад температури між центром і периферією керна збільшується.

Застосування керованої пересипки із графітованого коксу дозволило отримати доволі рівномірне температурне поле у період усієї кампанії графітування. Вплив зазору між заготовками та ПВО пересипки і на якість кінцевих виробів досліджувався у. Було встановлено, що зменшення ПВО пересипки призводить до більш рівномірного розподілу джоулевої теплоти між заготовками і пересипкою та дозволяє більш рівномірно нагрівати заготовки [13].

Наразі у промисловості відсутні універсальні показники якості графітованих виробів. Тому вимоги до якості визначаються для кожного типу продукції окремо, виходячи з умов її експлуатації безпосередньо у промислових агрегатах. В залежності від вимог проводиться оцінка за такими показниками:

- фізичні властивості: істинна і позірна або об'ємна густина та поруватість, питомий електричний опір, теплопровідність, масова теплоємність, термічний коефіцієнт лінійного розширення;
- механічні властивості: міцність, модуль пружності та зсуву, коефіцієнт тертя;
- хімічні властивості: окислення, участь у реакціях утворення карбідів;
- вміст домішок: вміст заліза, сірки та ін.

Температурні залежності фізичних властивостей графітових виробів досліджувались Шулеповим С.В. [19], Веселовським Б.С. [27] та ін. [2, 28]. Згідно даним наведеним у цих працях з ростом температури штучного графіту теплопровідність зменшується, а масова теплоємність та механічна міцність

збільшується. ПЕО для графітованих виробів, що пройшли обробку при температурах вищих за 2500°C, є достатньо консервативною величиною: незначно знижується до температури 1000°C і далі з ростом температури незначно збільшується.

При необхідності також проводять оцінку коефіцієнта анізотропії для фізичних та механічних властивостей виробів, який залежить від способу пресування та вихідної сировини. Вміст домішок залежить від зольності вихідного матеріалу та технологічних добавок, що вводяться у вироби при їх формуванні [13]. Усереднені значення фізичних властивостей вуглеграфітових виробів при кімнатній температурі наведені в табл. 1.2.1 за даними [2, 19, 27, 28, 29]

Таблиця 1.2.1 – Фізичні властивості вуглеграфітових виробів

спосіб пресування	витискання	витискання	формовка
показник			
Максимальна величина зерна, мм	4 – 8	$\leq 0,1$	$\leq 0,1$
Об’ємна густина, кг/м ³	1500 – 1650	1500 – 1650	1550 – 1700
Теплопровідність, Вт/(м·К)	>116	>116	70-140
Поруватість, %	23 – 30	20 – 27	20 – 25
Питомий електричний опір, мкОм·м	6 – 13	6 – 13	8 – 20
Коефіцієнт лінійного розширення, 10^{-6} K^{-1}	1 – 3,5	1 – 3,5	1,5 – 5
Модуль пружності при розтягу, МПа	5 – 11	5 – 10	6 – 12
Межа міцності, МПа			
- на стиск	15 – 30	20 – 40	25 – 60
- на згін	5 – 15	12 – 25	10 – 35

В Україні випускаються електроди різного діаметру від 200 до 700 мм та різної довжини від 1600 до 2500 мм, подові блоки для алюмінієвих та аноди магнієвих електролізерів, ніпельні заготовки, футерувальні плити різноманітних типорозмірів та ін. В табл. 1.2.2 приведені фізико-механічні показники якості графітових електродів, що виробляються в Україні (за даними СТП-044-03).

Таблиця 1.2.2 – Фізико-механічні показники електродів українського виробництва

	Значення показника для марок графітового матеріалу				
	ЕГ	ЕГП	ЕГС	ЕГСП	ДБ
Густина, кг/м ³ , min	1520	1620	1520	1620	1600
- об'ємна	2200	2200	2200	2200	2200
- істинна					
Поруватість, %, max	30	28	30	28	20
Питомий електричний опір, мкОм·м, max	12	10	9	8	10
Межа міцності, МПа, min	16,0	17,0	14,0	17,0	17,6
- на стиск	4,9	10	5,5	9,0	–
- на згин					
Зольність, %, max	0,5	0,5	0,3	0,3	5

Прийняті позначення: Г – графіт; Е – електродний; П – просочений; С – спеціальний; ДБ – доменні блоки.

1.3. Опис технологічного процесу виробництва вуглецевих виробів

Принципова технологічна схема електродного виробництва складається із ряду основних операцій: прийом та підготовка сировинних матеріалів, приготування електродної маси, формування заготовок, обпалення, кропотка, графітування та механічна обробка заготовок.

За цією схемою виробляють графітовану продукцію. При виготовленні вугільних виробів основним є графітування, а товарні маси після змішування і брикетування відправляються споживач.

Як показує значний досвід заводів, всі технологічні операції мають велике значення для забезпечення високого виходу якісної електродної продукції.

Дуже важливо чітко організувати роздільне надходження та закрите зберігання сировинних матеріалів роздільних за своїми властивостями. Це дозволяє забезпечити точне дозування сировини на наступних стадіях виробництва, що є основою для отримання виробів стабільної якості.

Дотримання режимів змішування, охолодження та пресування електродної маси, а також застосування мундштуків заданої геометрії за формування дає можливість отримувати заготовки з високим виходом придатності. Під час обпалення, найдовшому із процесів, заготовки зазнають значні термохімічні зміни, в результаті яких формуються основні властивості майбутніх виробів. Для забезпечення збереження форми та цілісності заготовок, отримання міцного та однорідного по структурі обпаленого матеріалу, необхідно строго витримувати всі технологічні параметри обпалення.

При наступній термообробці заготовок у печах графітування, вони набувають високу електро- та теплопровідність. В даному випадку необхідне дотримання не лише електричних режимів графітування, але і схем завантаження та упакування печі пересипковими та теплоізоляційними матеріалами.

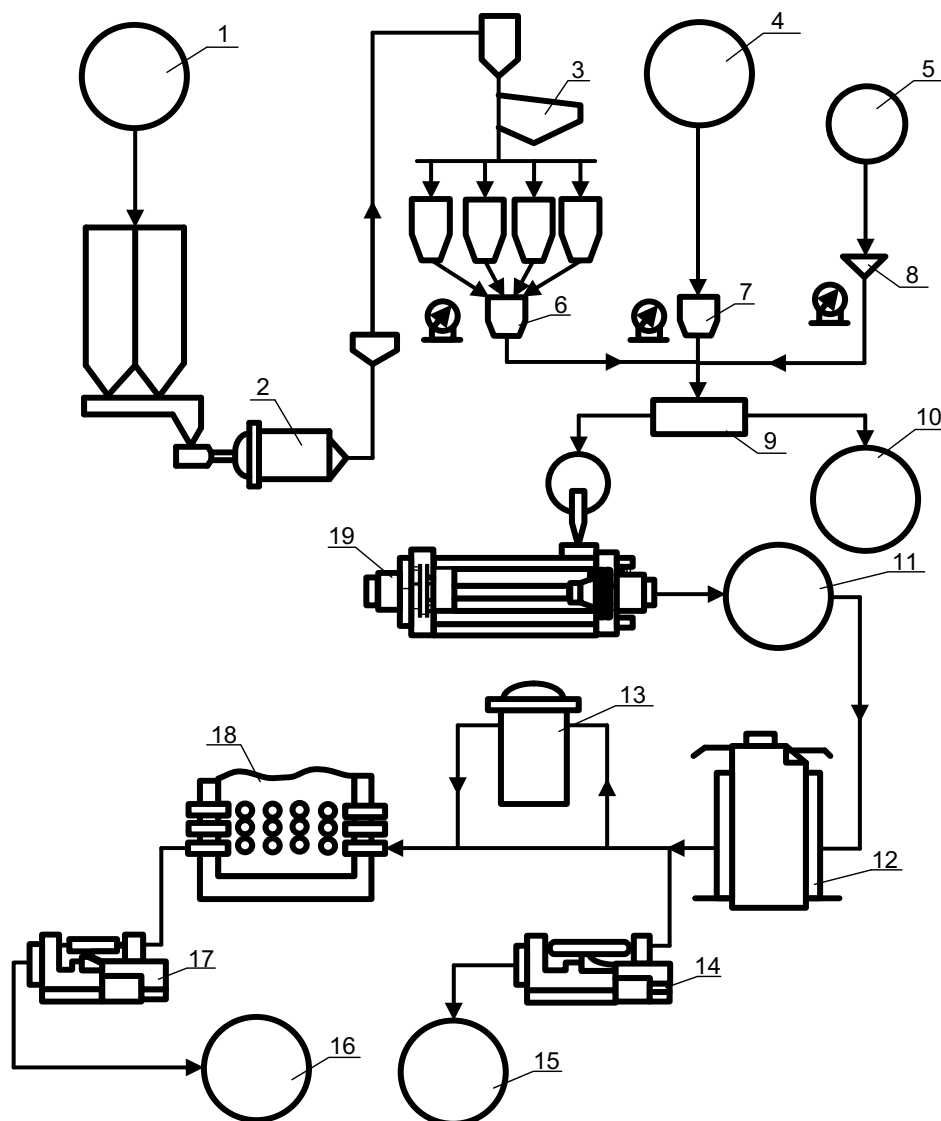


Рис.1.3.1 Технологічна схема електродного виробництва: 1 – Склад сировини, 2 – дроблення та розмелення, 3 – розсів, 4 – склад пеку, 5 – склад добавок, 6 – дозування шихти, 7 – дозування пеку, 8 – дозування добавок, 9 – змішування, 10 – товарні маси, 11 – склад «зелених» заготовок, 12- обпалення, 13 – кропотка, 14 – механічна обробка вугільної продукції, 15- склад вугільної продукції, 16 – склад графітованої продукції, 17 – механічна обробка графітованої продукції, 18 – графітування, 19 – пресування.

Точна обробка ніпеля та ніпельного гнізда досягається в процесі механічної обробки і в значній мірі впливає на питому витрату електродів у споживачів.

В отриманні якісних виробів електродного виробництва важливу роль грає контроль, дотримання технологічного режиму і властивостей сировини, напівпродуктів та готової продукції на кожному етапі [29].

Сировиною для отримання штучного графіту слугують продукти нафтової та кам'яновугільної промисловості: піролізні та крекінгові нафтові кокси, антрацити та

термоантрацити, пекові кокси. Ці продукти розрізняються не лише за способу їх отримання, але і по вмісту вуглецю, домішок, фізико – хімічним та механічним властивостям.

Нафтові кокси є продуктами коксування нафтових залишків, наприклад, гудронів та крекінг – залишків. Їх властивості залежать не тільки від складу вихідної нафти, але і від способів її переробки. Нафтові кокси – високоякісний вуглецевий матеріал, що містить до 98% вуглецю та мало домішок. Вони мають темний колір, блищать та мають великі пори.

Антрацити використовуються в основному у виробництві вугільних електродів та вугільних виробів. Термоантрацити створюють термообробкою антрацитів за температури близько 1400К.

Пековий чи смоляний кокс отримують при переробці кам'яновугільної смоли. За своїми перевагами для виробництва штучного графіту він близький до нафтового коксу. Пековий кокс містить меншу кількість летких речовин. Густина його сягає $(1.8 - 1.9) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Практика показала, що графітовані електроди, що виготовлені на основі пекового коксу, термостійкі, володіють великою механічною міцністю й достатньою електропровідністю.

Кокси, що використовуються у виробництві вуглеграфітових матеріалів, неоднорідні за своєю структурою. В них виявлені принаймні дві яскраво виражені складові – точкова та волоконна. Виділення цих структурних складових з шматків коксу та вивчення їх властивостей показало, що вони володіють різними механічними та фізико – хімічними властивостями. Ці дані вказують на необхідність диференційованого підходу до вибору сировини певної структури для того чи іншого виду продукції.

Характеристика сировини буде неповною якщо не згадувати про в'язучі матеріали. Без них в наш час неможливо уявити виробництво монолітних вуглеграфітових виробів. В якості в'язучого слугують кам'яновугільні пеки з різними температурами розм'якшення та смоло – пеки. Пеки отримують з кам'яновугільної смоли після виділення з неї антраценових масел в перегонних кубках. Від ступеню виділення масел залежить склад пеку і температура

розм'якшення цієї в'язкої та чорної маси. По температурі розм'якшення пеки поділяють на тверді, середні та м'які. У виробництві вуглеграфітових виробів найширше використовують середньотемпературний пек. Однак, зараз робиться все більше спроб використати у виробництві високоплавкого пеку.

Нижче описана типова схема отримання графітованої продукції.

Перед використанням, сировина проходить ряд підготовчих операцій. Першою з них є операція попереднього дроблення. Сирі вуглецеві матеріали із складів надходять до дробарок. Розмір шматків після дроблення сягає 40 – 45 мм. Роздроблений вуглецевий матеріал надходить в прокалювальні печі, де з нього видаляються леткі речовини та волога. Густина та електропровідність матеріалу зростають. Зазвичай температура прокалювання підтримується не нижче температури обпалювання.

При температурах 773 – 1973 та 2673 К прокалювання менш ефективно, ніж прокалювання за температури 1573 К.

Прокалений матеріал після охолодження надходить у відділення розмелу, де він розмелюється до зерен розміром 0,5 – 10 мм. В ситовому відділі за допомогою вібраційних та обертових сит він розсіюється по фракціям та зсипається у сортові бункери. Варто відзначити, що завдяки структурній неоднорідності коксів при розмелі та просіюванні відбувається деякий натуральний поділ на волокнисту та точкову складову структури. В результаті цього окремі фракції виявляються збагаченими волокнистою складовою, що повинно враховуватись при складанні сумішей.

Правильно підібрана суміш призводить в подальшому до збільшення механічної міцності виробів. Великі зерна у виробках грають роль скелету, а малі – наповнювача. Кожний вид вуглеграфітової продукції має свій рецепт виготовлення, який розроблений завдяки численним експериментам.

Ілюстрації до сказаного можуть слугувати таблиці 1.3.1 та 1.3.2.

Із сортових дозувальних бункерів деяка кількість кожної фракції та в'язуче (кам'яновугільний пек) подаються у змішувач. Гарячі змішувачі оснащені спеціальними паровими сорочками для підігріву. Шихта перемішується протягом 1

– 5 год. Температура маси сягає 425 К. Готова електродна маса зі змішувачів надходить в міксери, де вона охолоджується за допомогою вентиляторів до 373 К. Тільки після цієї операції вона надходить до пресового відділу.

Мікроскопічні дослідження показали, що за гарного змішування електродна маса характеризується рівномірним розподілом великих і малих компонентів наповнювача і однаковим розподілом пекових прошарків у масі. Якість маси залежить не тільки від вмісту в'язучого, але й від температури та часу змішування. Очевидно, що при цьому не останню роль відіграє змочуваність наповнювача в'язучим. Нерівномірне розподілення в'язучого і компонентів наповнювача призводить до дефектів макро- і мікробудови.

В пресовому відділі вуглецевій масі надають необхідну форму і отримують так звані «зелені» заготовки.

Пресовані маси виготовляють одним із двох способів: 1) формування в закриту матрицю, 2) продавлюванням через мундштук відповідної форми. Важливо зазначити, що в обох випадках пресування в зелених заготовках виникає текстура. Вона не зникає навіть після високотемпературної обробки і проявляється в тому, що вуглеграфітові вироби в залежності від напрямку по відношенню до осі пресування мають різні механічні та теплофізичні властивості. Причини виникнення текстури криється в анізотропічності зерен наповнювача і способі пресування.

В процесі пресування видовжені частинки коксу розташовуються своїми довгими осями перпендикулярно до напрямку прикладення сили. Це значить, що при формуванні вони розташовуються перпендикулярно до осі пресування, а при продавлюванні через мундштук – паралельно осі пресування.

Після завантаження вуглецевої маси в циліндр пресу її ущільнюють. Для підтримання необхідної температури маси електродні преси обігрівають парою. Потужність пресів коливається в широких межах. Очевидно, що для пресування великогабаритних зелених заготовок, наприклад, вагою до 30 тон необхідні преси.

Ущільнена електродна маса випресовується через мундштук за тиску $(175 - 350) \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$. В закриту прес-форму пресують при підвищених тисках. Вони складають близько $200 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$ і вище. Вироби після пресування мають

температуру близько 350 K і можуть деформуватись під дією власної ваги. Для попередження деформації їх охолоджують до затвердіння у водяній ванні.

Застиглі «зелені» заготовки завантажують в кільцеву багатокамерну газову піч і обпалюють без доступу повітря. З цією метою, вироби, що розміщені в касетах печі, засипають, а зверху піч замурують. В якості засипки часто застосовують гранульовану коксо-піщану суміш. Під склепінням печі в полум'яних колодязях спалюється генераторний газ. Продукти горіння через спеціальні димоходи надходять із однієї камери в іншу і розігрівають її. Вироби, що обпалюються, не контактують з продуктами горіння, котрі, віддавши тепло, викидаються в атмосферу через димову трубу. Температура засипки, що вимірюється за допомогою термопар сягає 1200 – 1500 K. Операція обпалення дуже довга і триває до 20 – 40 діб.

Вивантаження обпалених виробів здійснюється лише після повного охолодження печі. Після вивантаження придатні вироби піддають механічній очистці від тих, що спеклися і прикоксованих часток засипки. Для надання їм необхідних розмірів і форми їх обробляють на токарних станках.

Отримані в процесі обпалення вуглецеві вироби називаються вугільними. Частина з них надходить до заводів – споживачів, а інше частина зазнає високотемпературної обробки в електричних печах графітування. В окремих випадках вугільні вироби просочують кам'яновугільним пеком, штучними смолами, тощо. Після просочування їх повторно обпалюють.

В процесі обпалення відбувається коксування в'язучого, а заготовки, що обпалюються, спікаються в міцні моноліти. На перших стадіях обпалення із пресованих виробів видаляються леткі речовини, що присутні у в'язучому. Засипка, що щільно облягає заготовки, зберігає їх від деформації в період розм'якшення. Більша швидкість підйому температури тут не припустима: вона може призвести до інтенсивного виділення летких речовин і розтріскування виробу, що обпалюється. В подальшому в'язуче коксується і коксова решітка, що утворюється при цьому, міцно зв'язує вуглецеві зерна наповнювача. Тривала витримка (близько 50 год) за максимальної температури обпалення дозволяє отримати вугільні вироби з підвищеною щільністю.

Вугільні заготовки, призначені для високотемпературної обробки завантажують в однофазну електричну піч опору, температура в якій піднімається до 2800 – 3300 К. Робочим опором в цій печі слугують самі вугільні заготовки, поміщені в пересипку із гранульованого коксу. При пропусканні електричного струму через робочий опір відбувається розігрів печі до високих температур.

Для отримання графіту високої чистоти на ряду з нагріванням використовують хлорнофторну очистку. Графітовані вироби іноді зазнають додаткової обробки, а саме просочування різноманітними імпрегнатами та нанесенню захисних покриттів.

Із вищевказаного слідує, що властивості вугільних графітованих виробів визначається особливостями вживаної вуглецевої сировини і технологічними факторами. Механічні і фізико-хімічні властивості вуглеграфітових матеріалів формують в процесі виробництва в залежності від призначення виробів [19].

В таблиці 1.3.3 наведені порівняльні характеристики різних видів вуглеграфітових матеріалів.

Основним параметром, що визначає перебіг процесу графітування, є температура [30]. Швидкість підвищення температури визначає ефективність процесу: якість виробів та витрати електроенергії. Максимально досягнутий рівень температур в “найхолодніших” точках виробів визначає тривалість кампанії. А максимально досягнутий рівень температур на межі теплоізоляція – футеровка впливає на строк служби будівельних конструкцій печі. Визначення температури у внутрішньому просторі печі графітації – це надзвичайно складна технічна задача. Серед чинників, що ускладнюють контроль, головними є високі рівні температур (в деяких місцях температура перевищує 3000°C), значні геометричні розміри об’єкту (складність розташування датчиків в контрольних точках при прямих методах вимірювання), агресивна атмосфера внутрішнього простору (вуглець при високих температурах виступає активним відновником, наявність газів з великим вмістом сірки та кремнію тощо), постійна усадка об’єму завантаження, вплив потужних електромагнітних полів, забрудненість повітря вуглецевим пилом тощо [1].

Розглянемо можливі способи, якими можна виміряти температуру під час кампанії графітації, та їх потенції у використанні.

Таблиця 1.3.1 – Гранулометричний склад шихти (в вагових долях), що застосовується для виготовлення графітової продукції

Призначення шихти	Фракції, мм			Тонкий помол: вміст зерен менших 0,074 мм – близько 55%	В'яжуче – кам'янову гільний пек
	4,2 – 12,7	0,64–1,27	0,28–0,64		
Для графітових заготовок, що пресуються в матриці	–	–	50	50	34
Для електродів: а) діаметр 150 – 510 мм	–	25	15	60	32
Б) діаметр 510 – 610 мм	20	10	10	60	30
Для анодів чи електродів малих діаметрів	–	–	–	100	36

Таблиця 1.3.2 – Гранулометричний склад суміші (в вагових долях), що застосовується для виготовлення графітованих електродів

Діаметр електроду, мм	Фракції, мм			Тонкий помол: вміст зерен менших 0,060 мм – близько 70%
	1,5 – 3,0	0,6 – 1,5	0,3 – 0,6	
70	–	–	20	80
200	–	40	15	45
300	25	30	–	45
500	35	20	–	45

Таблиця 1.3.3 – Властивості вугільних та графітованих виробів

Показник	Електроди		Високодисперсний графіт	
	вугільні	графітовані	спосіб видавлювання	спосіб пресування в закриту форму
Максимальна величина зерна, мм	~10	~4	<0,1	<0,1
Об'ємна густина, 10^3 кг/м^3	1,45 – 1,60	1,50 – 1,65	1,55 – 1,65	1,55 – 1,70
Пористість, %	25 – 30	23 – 30	20 – 27	20 – 25
Електроопір, 10^{-6} ом.м	40 – 65	6 – 13	6 – 13	8 – 20
Коефіцієнт лінійного розширення, $10^{-6} \text{ град}^{-1}$ (293° –	4 – 5	1 – 3,5	1 – 3,5	1,5 – 5

473° K)				
---------	--	--	--	--

Продовження таблиці 1.3.3

Модуль Юнга, 10^8 Н/м ²	70 – 110	50 – 110	50 – 100	60 – 120
Межа міцності, 10^8 Н/м ² а) на стиснення	250 – 500	150 – 300	200 – 400	250 – 600
б) на вигин	60 – 150	50 – 150	120 – 250	100 – 350
Теплопровідність, 4,18 кдж/м.год.град.	3,5 – 5	>100	>100	60 – 120

Дилатометричний метод [35] засновано на порівнянні лінійного подовження дилатометричного тіла та графітованого стрижня при нагріванні. Дилатометричні датчики градуують в лабораторних умовах. Вони мають задовільну точність ($\pm 15^\circ\text{C}$) і працюють в широкому діапазоні температур (800 .. 3000°C). Довжина промислових дилатометричних датчиків не перевищує 1,3 м, тому для використання в печах графітації такі датчики треба виготовляти індивідуально. Широкого застосування дилатометричний метод не набув через надзвичайно низьку механічну міцність датчиків (особливо великої довжини), які не можуть працювати в умовах активної усадки об'єму завантаження печі.

Пірометричний метод [8] передбачає використання графітової труби з днищем, що є точкою візира. Трубу встановлюють в піч через отвір в футеровці так, щоб розташувати днище труби безпосередньо в контрольній точці. Вимірювання здійснюють за допомогою яскравісного пірометра. При високих температурах, внаслідок окислювання, в оптичному каналі труби утворюється димний газ, що унеможливорює подальше вимірювання. Для забезпечення реєстрації температури впродовж всієї кампанії та підвищення точності вимірювань оптичний канал

звільняють від димних газів допоміжними засобами: примусовою вентиляцією, природною тягою, продувкою інертним газом або створенням надлишкового тиску інертного газу в порожнині труби. Використання допоміжних пристроїв значно ускладнює вимірювання та підвищує їх вартість. Відоме рішення, при якому неокисне середовище з надмірним тиском утворюється у візирній трубі природним шляхом.

Перевагою методу є можливість його застосування в широкому інтервалі високих температур (800 .. 4000°C) [32]. До недоліків відноситься порівняно низька точність (до рівня 1800°C похибку оптичних засобів контролю оцінюють в $\pm 50^\circ\text{C}$, при більш високих температурах похибка може перевищувати $\pm 100^\circ\text{C}$). Крім того, зона встановлення візирної труби обмежена її конструкцією (занадто масивна труба охолоджує контрольну точку і спотворює результати, але недостатня міцність труби підвищує ризик її руйнування внаслідок усадки об'єму завантаження та зовнішнього підгоряння). Як правило, пірометричний метод застосовують тільки для контролю температури периферії керна.

Визначення температури за допомогою термопар. Термоелектричні перетворювачі мають просту конструкцію, високу надійність та низький показник теплової енергії. За допомогою термопар можна вимірювати температуру в широкому діапазоні (в залежності від матеріалу термоелектродів: $-270 \dots +2500^\circ\text{C}$) з високою точністю перетворення. Метод дозволяє використовувати датчики довжиною до 20 м. Для середньотемпературних вимірювань (до 1000°C) в печах графітації широко застосовують хромель-алюмелеві (ХА) термопари, оскільки вони мають майже лінійну термоелектричну характеристику, високу жаростійкість та низьку вартість. Точність вимірювання ХА-термопарами складає $\pm 4^\circ\text{C}$ для температур до 300°C, та $\pm 1\%$ для більш високих температур [33].

Для вимірювання більш високих температур найчастіше використовують вольфрам-ренієві (ВР) термопари різних градувань. В нейтральному середовищі ВР-термопари здатні вимірювати температуру до 2500°C. При використанні ВР-термопар в агресивному середовищі печі графітації температурний діапазон їх застосування обмежено жаростійкістю захисного керамічного кожуха. Захисна

кераміка на основі окису алюмінію має межу стійкості 1600 .. 1700°C [33]. Існує захисна кераміка, межа стійкості якої сягає 2200°C (наприклад, на основі нітриду бору), але через високу вартість широкого застосування в графітовому виробництві такі термопари не набули. Точність вимірювання ВР-термопарами складає 4 %. Оскільки робочий діапазон температур печі графітації значно перевищує діапазон застосування термопар, метод, здебільшого, застосовують при експериментальних дослідженнях початкової стадії кампанії. При цьому термопари використовуються тільки один раз (вимірювання здійснюють до моменту їх руйнування), що значно підвищує вартість таких досліджень. В промисловій практиці термопари можуть використовуватися для контролю температури футеровки печі, або, як допоміжний засіб в непрямих методах контролю.

Непрямі методи визначення температури засновані на розташуванні в просторі печі графітового тепловода так, щоб його робочий кінець знаходився в контрольній точці, а інший кінець було спрямовано в напрямку футеровки печі. Вимірювання температури в декількох точках “холодної” частини тепловода за допомогою термопар дозволяє визначити температуру робочого кінця. Автори [34] пропонують інший кінець тепловода підтримують при постійній температурі примусовим охолодженням, а температуру робочого кінця визначають за допомогою номограми, розрахованої до 2400°C. Точність метода невідома.

У іншій же ж праці [35] температуру робочого кінця T_0 розраховують за експоненціальною залежністю, а межа застосування методу обмежена тільки процеспроможністю термопар в місцях їх встановлення в тепловоді. Точність вимірювань залежить від кількості точок контролю (їх кількість поступово зменшується при виході з ладу термопар через надмірне підвищення температури в місцях встановлення). Середня похибка методу в області високих температур складає 10 .. 20 %.

Метод можна застосовувати для контролю температури периферії керна практично до закінчення кампанії графітації.

Сигнальний метод [36] будується на використанні плавкого датчика, який встановлюють в контрольній точці печі. Датчик споряджено механічним перетво-

рювачем та з'єднано із жаростійким хвильоводом, інший кінець якого знаходиться за межами печі. Механічний перетворювач виконано, як тягар, підвішений безпосередньо на чутливому елементі плавкого датчика в закритому циліндрі. При досягненні температурою в контрольній точці заданого рівня (температури плавлення чутливого елемента) спрацьовує механічний перетворювач. Факт спрацьовування визначається шляхом аналізу акустичного сигналу у хвильоводі за межами печі. Точність визначення температури сигнальним методом оцінюється в 15 %. Метод дозволяє сигналізувати про досягнення заданого рівня температури в будь-якій контрольній точці печі, де можна встановити плавкий датчик і може використовуватися для оціночного аналізу температурного стану керна.

Розрахункові методи. Всі наведені методи дозволяють (з тою чи іншою точністю) визначати температуру в контрольних точках печі, але оскільки температура дуже нерівномірно розподілена у великому об'ємі, навіть значна кількість контрольних точок не може характеризувати температурне поле печі в повному обсязі. Крім того, застосування більшості методів обмежено технологічними особливостями процесу графітації та високою вартістю застосування. Вказаних недоліків позбавлені розрахункові методи.

У праці [37] запропоновано визначати середню температуру виробів в печі графітації для будь-якого моменту кампанії графітації за результатами вимірювання кількості підведеної (на цей момент часу) енергії та розрахунку безрозмірної температури (за отриманим авторами залежностям з врахуванням числа Фур'є). Метод дозволяє оцінювати загальний енергетичний стан об'єкта, але непридатний для оцінювання розподілу температури в об'ємі печі.

Визначити температуру в будь-якій точці печі графітації можна шляхом розрахунку температурного поля за допомогою математичної моделі, що враховує геометричні розміри об'єкта, теплофізичні властивості матеріалів та поточні витрати енергії на графітування [1].

1.4. Характеристика печі графітування

На рисунку 1.4 схематично зображена завантажена піч графітування. Футеровка печі графітування виконується з шамотної цегли і складається з піддону 1, торцевих стінок 2 та бічних стінок (на рисунку не вказані). Часто бічні стінки виконують розбірними, як правило із жаротривкого бетону. Стационарні бічні стінки та піддон, як правило, містять канали 3 для повітряного охолодження футеровки під час кампанії графітування.

В торцеві стінки печі вмонтовані струмопідвідні електроди 4, до яких із зовнішньої сторони під'єднуються пічні шини. Для запобігання окиснення електродів під час експлуатації, їх герметизують в місцях встановлення. Для цього в торцевих стінках передбачені порожнини 5, що щільно заповнені дрібнодисперсним графітом. Внутрішню поверхню торцевої стіни захищають за допомогою захисного екрану 6 із вуглецевих плит або вуглецевої маси товщиною 80..100 мм. Верхню поверхню торцевих стінок захищають бетонними плитами 7.

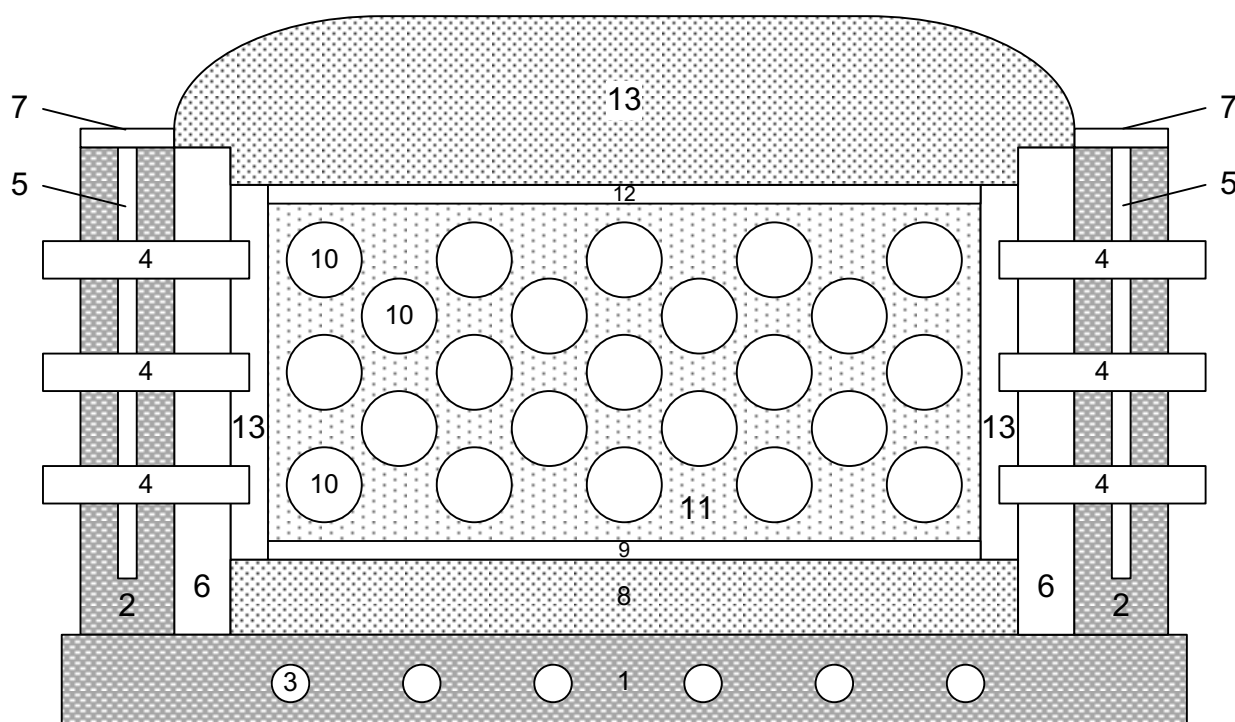


Рис. 1.4 – Схематичне зображення завантаження печі Ачесона

Після дрібного ремонту піч графітування завантажують для наступної кампанії.

Для цього піддон печі вкривають шаром теплоізоляційної шихти 8 завтовшки 500..900 мм. теплоізоляційна шихта складається з гранульованого коксу фракції 0..10 мм, піску та деревної тирси. Значну частину теплоізоляції може скласти зворотна шихта.

Формування керну печі відбувається таким чином: бічні та торцеві стінки відгороджують щитами так, щоб між ними та стінками існував вільний простір, потім на шар теплоізоляції 8 насипають шар металургійного коксу 9 фракції 10..25 мм; після цього перпендикулярно до осі печі завантажується перший ряд електродних заготовок 10, а простір між самими заготовками заповнюється керованою пересипкою 11; за таким самим принципом утворюють наступні шари із електродними заготовками. Зазвичай пересипку виготовляють із гранульованого металургійного коксу фракції 10..25 мм, або дрібнішої, за графітування дрібної електродної продукції. Верх керну вкривають насипом із графітованого коксу 12. Коли керн сформовано, простір між щитами та бічними стінками заповнюють теплоізоляційною шихтою (на рисунку не вказано), а простір між щитами і торцевими стінками наповнюють графітованим коксом 13, після чого щити виймають. Наступним кроком є формування шару верхньої теплоізоляції 14 товщиною 500..800 мм. [1].

Процес графітування електродних заготовок в промисловості здійснюється в електричних печах опору, в яких сам завантажуваний у піч матеріал слугує активним електричним опором у загальному ланцюгу агрегату графітування: Джерело живлення – коротка мережа – піч. Матеріал, що завантажується, розігрівається у результаті безпосереднього протікання по ньому електричного струму, через це печі графітування відносять до категорії печей прямого нагріву. Для аналізу процесу нагріву власне електродних заготовок, або, точніше, принципів формування температурного поля у об'ємі печі графітування, розглянемо структуру завантаження печі як електричного опору. На рис.1.4 наведено повздовжній переріз печі графітування, із якого видно, що завантаження печі являє собою чергування рядів заготовок та вуглецевої шихти (пересипки), що оточена з усіх боків шаром теплоізоляційної шихти. До того ж питомий електричний опір (ПЕО) пересипки

значно вище (приблизно в 50 – 100 разів), ніж ПЕО заготовок. В результаті цього все джоулеві тепло виділяється у шарі пересипки, а нагрів електродних заготовок здійснюється теплопровідністю та тепловим випроміненням від частинок пересипки. Через це нагрів власне електродних заготовок в печах графітування є опосередкованим.

При опосередкованому нагріві будь-якого твердого тіла (в даному випадку обпалених вуглецевих заготовок) у ньому виникають температурні градієнти, а отже, термічні напруження. Коли швидкість зміни температури велика, варто враховувати і динамічні ефекти, обумовлені змішуванням частинок тіла.

Щоб вирішити цю задачу необхідно передусім знати основні закономірності формування температурних полів, як в тілі заготовки, так і в об'ємі печі вцілому. Через це розглянемо характеристику печі графітування, як теплового об'єкта.

Наука про теплопередачу розглядає такий об'єкт, як складене анізотропне тіло, тепло- та електрофізичні властивості які залежать від його температури, а сам процес графітування в електричних печах – як задачу нестационарної теплопровідності із внутрішнім джерелом тепла за змінних граничних умовах. Інакше кажучи, в печі графітування тепловиділення та теплообмін відбувається у тісному взаємозв'язку, і через це не можна, наприклад, розглядати формування температурного поля у заготовках та пересипці незалежно від властивостей теплоізоляції або вирішувати задачу нагріву теплоізоляції не враховуючи конкретний режим вводу тощо. Сукупність усіх цих процесів, що відбуваються у робочому просторі печі за рахунок тепловиділення, і називаються тепловою роботою.

Теплову роботу визначають на корисну, котра являє собою передачу тепла електродним виробом, що нагріває і втраченою, що включає всі інші види споживання тепла.

Через це основною задачею теплового розрахунку є визначення корисної потужності, теплових втрат і розрахунок нестационарних теплових полів у заготовках, що нагріваються, пересипці, теплоізоляції та конструктивних елементах печі.

Аналітичне описання процесу теплопровідності у нерухомому анізотропному середовищі базується на законах збереження енергії і Фур'є, і призводить до диференціальних рівнянь теплопровідності із внутрішнім джерелом тепла, котрі зв'язують часову та просторову зміну температури. У даній задачі джерелом внутрішнього тепла є джоулеві енергія. Через це необхідно також вирішити задачу електромагнітного поля печі [31].

Рівняння процесу графітування здійснюється по електричним параметрам: потужності, струму, напрузі. Таким чином, щоб керувати процесом графітування або, що теж саме, керувати температурним полем печі, необхідно встановлювати взаємозв'язок між електричними характеристиками процесу і формуванням температурного поля.

Експериментально цю задачу виконати складно так як дослідження високотемпературних полів у вуглецевому середовищі є досить складним і, що найголовніше, отримана інформація обмежена. Для вирішення поставленої задачі розроблена математична модель промислового процесу графітування в електричних печах опору.

1.5. Постановка задачі

Графітування вуглецевих виробів, до яких відносяться електроди дугових сталеплавильних печей, подові блоки алюмінієвих електролізерів тощо, як правило, здійснюється в електричних печах опору по технології Ачесона. Печі Ачесона характеризуються істотною нерівномірністю розподілу температурного поля та нестабільністю електро- та теплофізичних властивостей матеріалів завантаження. При швидкому нагріванні печі збільшується нерівномірність температурного поля і, як наслідок, зростає термонапруження у виробах, що може призвести до браку продукції. У виробничих умовах з метою запобігання випуску бракованої продукції здійснюється опосередковане оцінювання термопружного стану виробів, що призводить до перевитрат електроенергії, а значить, до зниження ефективності виробництва.

Ще одним чинником перевитрат енергоресурсів є неточне визначення тривалості кампанії графітування, яка для гарантованого забезпечення нормативної якості готової продукції, як правило, триває довше, ніж потрібно.

Важливим показником ефективності виробництва вуглецевих виробів є якість кінцевої продукції, яка визначається державним стандартом України. Згідно стандарту електроди повинні мати високу теплопровідність та малий коефіцієнт температурного розширення, щоб уникнути руйнування електродної свічі внаслідок температурних напружень. Крім того, електроди сталеплавильних печей зазнають значних механічних навантажень, спрямованих під кутом до їх осі, що робить механічну міцність на вигин та розтяг надзвичайно важливим показником якості. В залежності від типу продукції до показників якості відносять питомий електричний

опір електродів, оскільки витрати останніх у сталеплавильних печах мають лінійну залежність від цього показника. Інтегральним показником якості графітованої продукції є ступінь графітування [1].

Названі вище обставини викликають необхідність з метою підвищення ефективності процесу графітування вуглецевих виробів розроблення сучасної системи оптимального керування ним на основі аналізу поточного стану технологічного процесу. Така система керування повинна забезпечувати випуск готової продукції заданої якості при функціонування процесу графітування у режимі ресурсо- та енергозбереження з урахуванням можливих непередбачуваних відключень енергоживлення.

Отже, у даній дисертації, задачами дослідження було визначено наступні:

1. Аналіз процесу графітування як об'єкту автоматичного керування;
2. Дослідження існуючих математичних моделей процесу графітування;
3. Побудова математичної моделі процесу графітування;
4. Дослідження температурних режимів процесу графітування вуглецевих виробів: нагрівання і охолодження;
5. Аналіз існуючих моделей спрощення складних математичних моделей з розподіленими параметрами процесу графітування вуглецевих виробів;
6. Побудова та дослідження спрощеної математичної моделі процесу графітування вуглецевих виробів;
7. Аналіз існуючих систем керування процесом графітування вуглецевих виробів;
8. Розробка алгоритму керування процесом графітування, що передбачає сукупність дій у разі штатного та нештатного режимів;
9. Розробка стартап проекту.

2. Математичне моделювання процесу графітування

2.1. Аналіз існуючих моделей процесу графітування в печах Ачесона

На даний момент, у численних наукових роботах запропоновано різноманітні спрощені чисельні моделі теплоелектричного стану печі графітування. Чалих Е. Ф. [38] розглядає математичну модель керну печі графітування змінного струму, яка може бути використана для розрахунку густини струму по перерізу керну печі з врахуванням поверхневого ефекту і ефекту близькості бічних струмопроводів до керну печі. Однак дана модель не дозволяє розраховувати температурні поля печі.

А. М. Фрідман, М. Г. Авет'ян і Н. А. Михайлов представили у своїй роботі [39] методику моделювання теплових полів печей графітування, в якій рівняння, що визначає електромагнітне поле печі, приведено до рівняння Лапласа, а теплове поле описано нелінійним рівнянням теплопровідності. При розробці цієї моделі авторами приймалися такі спрощення: рішення рівняння електромагнітного поля обмежено стаціонарним і двовірним випадками, а також спрощена геометрія керна.

Методика рішення на базі наближеного методу Галеркіна наведена у [40] авторами Arai Y. і Yokoyama T. В. Наведені два види чисельних моделей: kern без теплоізоляції і з шаром теплоізоляції. Розроблені чисельні моделі застосовувалися для оцінки залежності ККД печі від графіку підводу потужності і властивостей теплоізоляційних матеріалів і дозволили отримати якісний характер впливу моделюючих факторів, але не дали можливість виявити особливості формування

тривимірного температурного поля в об'ємі заготовок, тобто розробити і дослідити оптимальний режим підводу потужності.

Для дослідження ступеня впливу градієнта температур в заготовці на оптимізацію режиму нагріву в печі графітування Огнева М. Ф. у своїй роботі [41] застосовувалось рішення одновимірного диференціального рівняння теплопровідності методом кінцевих різниць. В результаті роботи були розроблені рекомендації щодо вибору впливових параметрів при розробці прискорених режимів графітування.

Знамеровський В. Ю. у своїх роботах [42, 43, 44] для розрахунку розподілу температурних полів в печі Ачесона запропонував використовувати методику чисельного рішення, засновану на методі елементарних теплових балансів з використанням явної і неявної схем апроксимації. В цих роботах піч графітування розглядається як єдина цілісна система, що містить: джерело електроживлення, коротку мережу, вироби, що підлягають графітування, допоміжні шихтові матеріали і футеровку печі. В запропонованій чисельній моделі розрахунковим елементом є вертикальний напівряд, що складається із заготовок, керованої пересипки, теплоізоляції і кладки печі. З метою зменшити похибку розрахунків теплових і електричних параметрів процесу графітування, автором була запропонована оригінальна методика розрахунків, що базувалася на тому, що процес енергообміну між елементарними об'ємами розглядалася з врахуванням одночасної зміни їх температури від дії внутрішнього джерела теплоти. Тепло- і електрофізичні характеристики матеріалу обирались в залежності від середнього значення температури від дії внутрішнього джерела теплоти, що дозволило врахувати вплив останнього на кожному часовому кроці [45].

В чисельній моделі, запропонованій Знамеровським В. Ю., внутрішнє джерело теплоти в елементах печі враховувало лише джоулеві теплоту. З метою прискорення розрахунку застосовувалося спрощення геометрії керну, круглий переріз заготовок замінювався на прямокутні рівновеликі площі.

Запропонована Знамеровським В. Ю. чисельна модель отримала свій подальший розвиток у роботах Кузнецова Д. М. і Шкуланова Е. Е. [6, 46, 47].

Чисельна модель, що використовувалася авторами у повному обсязі, описувала геометрію керна печі, а в рівняння балансу енергії елементарної комірки була введена складова, що враховує прирощення внутрішньої енергії чи зміну ентальпії. У такій постановці чисельна модель дозволяла враховувати теплоту хімічних реакцій, що відбувалися в елементах печі, що і було використано для врахування теплоти, пов'язаної зі звільненням сірки від зв'язків з вуглецем всередині коксових частинок.

Автором роботи [48] Кутузовим С. В. запропонована чисельна двомірна модель теплового стану печі графітування, що ґрунтується на рішенні диференційного рівняння теплопровідності з внутрішніми джерелами методом скінченних елементів. Чисельна модель дозволяє отримати розподіл температурних полів в поперечному перерізі печі для різних моментів часу. В запропонованій чисельній моделі величина внутрішніх джерел задається виходячи з графіку вводу електроенергії, а розподіл внутрішніх джерел по перерізу керна – у вигляді пропорційних співвідношень, що залежать від координат і часу. Запропонована Кутузовим С. В. модель враховує втрати теплоти на нагрів та випаровування вологи з пересипкових і теплоізоляційних матеріалів за рахунок використання ефективних коефіцієнтів теплоємності сипких матеріалів.

Коржик М. В. [1] для оцінки теплоелектричного стану печі графітування запропонував спрощену модель електричного поля керна і адаптивну модель температурного поля печі графітування, яка враховує витрати енергії на випаровування вологи і функціонує в умовах неповної інформації про вологість і фізичні властивості матеріалів завантаження.

У роботі Яримбаш Д. С. [49] з метою визначення електричних параметрів пічної петлі печі графітування, була запропонована тривимірна математична модель, що базується на системі рівнянь Максвелла для комплексних амплітуд векторного магнітного і електричного потенціалів, системі рівнянь конвективного теплообміну в наближенні Буссинеска і рівнянь теплопровідності. Розроблена автором модель враховує температурну залежність електромагнітних властивостей керна і провідникових матеріалів, ефекти витіснення і зовнішній поверхневий ефект.

До загальних недоліків розглянутих вище чисельних моделей можна віднести наступні:

- не враховується залежність фізичних властивостей сипких матеріалів від тиску;
- немає врахування масо- і теплообміну при випаровуванні і конденсації вологи сипких матеріалів, а також в деяких, вище розглянутих, чисельних моделях не враховується навіть вологовміст;
- не враховується теплота хімічних реакцій, що відбуваються в керні, за винятком врахування теплоти, пов'язаної зі звільненням сірки від зв'язків з вуглецем всередині коксових частинок;
- в багатьох чисельних моделях застосовується спрощення геометрії керна, а врахування торцевих втрат виконується шляхом задання усереднених коефіцієнтів форми, що зменшують точність розрахунку;
- одномірні і двовимірні моделі, не дозволяються оцінити радіальні перепади температур по горизонтальному перерізу заготовок, а усереднення властивостей рядів керна (заготовки і пересипка) збільшують неточність результатів розрахунку [50].

З вищесказаного слідує наступне, що в розглянутих чисельних моделях враховуються досить важливі особливості процесу графітування в печах опосередкованого нагріву, а їх застосування обмежено областю, в якій виконувалася перевірка їх адекватності. Відповідно, на даний момент досить гостро постає проблема побудови чисельної моделі печі графітування, що має розширені можливості по врахуванню таких факторів як:

- теплота хімічних реакцій, що відбуваються в печі;
- процес просадки сипких матеріалів;
- процес випаровування, масо переносу і конденсації вологи;
- залежність питомого електроопору пересипкових матеріалів від температури і тиску;

- контактні взаємодії різної природи і т.д.

Як висновок, можна сказати, що в результаті аналізу сучасного стану виробництва графітованої продукції, проведеного на основі розглянутих літературних джерел різних авторів видно, що:

- при виробництві графітованої продукції одним з найбільш важливих і енергоємних технологічних процесів переділ графітування;
- в промисловості графітування вуглецевомісної продукції проводять в однофазних електричних печах періодичної дії прямого (печі Кастнера) чи опосередкованого (печі Ачесона) нагріву, що забезпечують рівень температур у виробках 2400 – 3000 °С;
- графітування продукції в печах Ачесона, що історично отримали ширше використання, характеризується високим рівнем непрямих втрат теплоти (60 – 80%) і значною неоднорідністю температурного поля в поперечному перерізі керна, що знижує якість готової продукції;
- хоча печі Кастнера характеризуються більшою енергетичною ефективністю забезпечують менший градієнт температур в заготовках, та переобладнання виробництва графітованої продукції з печей Ачесона на печі Кастнера є дуже дорогим, тому не може бути проведеним підприємствами [50].

З вищесказаного слідує те, що для багатьох підприємств електродної промисловості надзвичайно актуальною є задача удосконалення теплових і енергетичних показників процесу графітування.

Проведена оцінка факторів, що впливають на температурні і енергетичні режими процеси графітування, і виявлено, що:

1. основним критерієм, що впливає на якість графітованої продукції є температура – її мінімальний рівень, швидкість зміни і розподіл по керну;
2. на температурний режим роботи найбільш сильно впливає енергетичний режим роботи печі, властивості теплоізоляційних матеріалів і геометрія печей і керна;
3. енергетичний режим роботи характеризується регламентом підводу потужності і питомою витратою електроенергії, в більшій мірі залежить від

геометрії ядра і властивостей ядрової пересипки, тобто температурної залежності її електропровідності;

4. вплив різноманітних факторів на температурний і енергетичний режими роботи доволі неоднозначний, тому достатньо гостро постає задача дослідження розподілу температурних полів в печах графітування;
5. дослідження температурних режимів роботи печі Ачесона при температурах більше ніж 2400°C за допомогою прямих методів вимірювання є досить складною задачею, крім того самі виміри мають високу вартість;
6. найбільш перспективним методом для дослідження температурних режимів роботи печі графітування з визначенням впливу різноманітних факторів на їх формування є чисельне моделювання.

2.2. Математична модель процесу графітування вуглецевих виробів

Перед тим, як формулювати математичну постановку задачі теплоелектричних полів печі Ачесона необхідно спочатку визначити, які фізичні процеси, що відбуваються при графітуванні електродних виробів, впливають на формування цих полів, тобто сформулювати фізичну модель процесу графітування заготовок у печі непрямого нагріву. Ґрунтуючись на даних літературних джерел та досвіду експериментально-теоретичних досліджень авторів фізична модель процесу графітування в печі Ачесона може бути сформульована наступним чином.

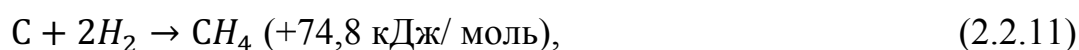
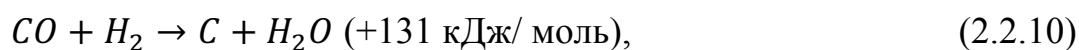
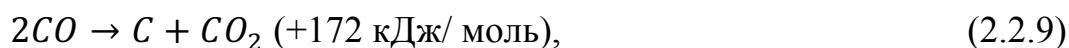
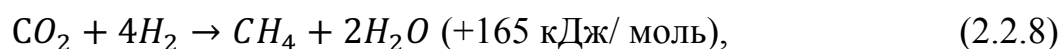
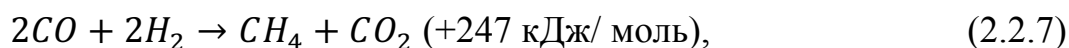
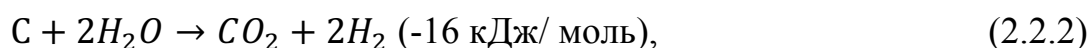
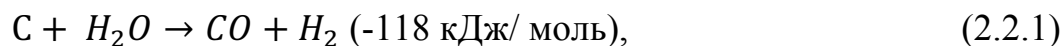
Робочий простір печі Ачесона представляє собою витягнутий паралелепіпед з відкритим верхом, над яким встановлений дзвоноподібний газозбірник, з'єднаний з димовідсмокчувачем. Робочий простір печі заповнюється заготовками, які засипаються електропровідною та теплоізоляційною пересипкою. Електропровідна і теплоізоляційна пересипка представляє собою вологий сипучий матеріал і відрізняється між собою ефективним діаметром гранул. Простір між гранулами заповнений димовими газами. Таким чином, можна сказати, що простір між заготовками і стінками печі заповнено двофазним середовищем. Через піч пропускається електричний струм. Електричне поле печі вважається безвихровим з

відсутністю термоелектричних ефектів. Нагрів заготовок і теплоізоляційної пересипки відбувається непрямим шляхом за рахунок джоулевої теплоти, що виділяється в електропровідній пересипці і хімічних окисних реакцій. Теплота, що виділяється в печі, також витрачається на нагрів оточуючих елементів, відновні хімічні реакції і втрати в навколишнє середовище. В процесі нагрів печі відбувається інтенсивне випаровування вологи, що призводить до стрибкоподібної зміни фізичних властивостей пересипки.

Випаровування вологи в процесі розігріву печі починається в центральній зоні керованої пересипки. Пара, що утворилася, розширюється і викликає переміщення невикпарованої незв'язаної вологи в периферійні холодні шари керованої пересипки, де відбувається її конденсація. Подальше випаровування вологи з керованої пересипки супроводжується проникненням пари в теплоізоляційну шихту, виштовхуванням незв'язаної вологи до стінок і підлоги печі, конденсацією пари в «холодних» шарах теплоізоляційної шихти і частковою його евакуацією в навколишнє середовище. Сконденсована в теплоізоляційній шихті вода під дією гравітаційних сил опускається донизу, тим самим підвищуючи концентрацію вологи в подинній теплоізоляції. При подальшому нагріві печі відбувається випаровування вологи з теплоізоляційної шихти з механізмом переміщення пари і вологи аналогічно описаному вище. Варто відзначити, що при досягненні певної концентрації незв'язаної вологи в сипучих шарах пересипки може спостерігатися її переміщення в зони з меншою концентрацією вологи (більш нагріті, центральні зони) під дією капілярних сил.

Утворена при випаровуванні волога верхніх шарів подинної теплоізоляції і прикерованих шарів бокової теплоізоляції пара, практично в повному об'ємі, проходить через нагріту керовану пересипку, яка повністю складається з вуглецевого матеріалу. Внаслідок чого, при високих температурах керованої пересипки (понад 650 °C) відбувається конверсія водяної пари, яка супроводжується газифікацією керованого коксу зі значним поглинанням теплоти. Основні хімічні реакції газифікації керованої коксової пересипки і їх тепловий ефект (при температурі керованої пересипки близько 800 °C) наведені в рівняннях (2.2.1 – 2.2.5).

Продукти реакції газифікації – оксид вуглецю і водень, частково евакууються в навколишнє середовище, і частково, проходячи через «холодні» шари теплоізоляції, вступають в екзотермічні реакції з утворенням води і метану. Основні хімічні реакції, що відбуваються в зоні конверсії оксиду вуглецю та водню і їх тепловий ефект (при температурі теплоізоляції близько 200 °С) наведені в рівняннях (2.2.6 – 2.2.12).



Утворена, в результаті конверсії окису вуглецю і водню водяна пара, конденсується і під дією гравітаційних сил опускається в подинну теплоізоляцію, де знову випаровується.

Таким чином, завдяки механізму переміщення вологи і пари і механізму газифікації коксової пересипки відбувається циркуляція води і пари в об'ємі печі до повної її евакуації в оточуюче середовище.

З наведених рівнянь хімічних реакцій (2.2.1) – (2.2.12) видно, що більшість з цих реакцій можуть бути як прямими, так і зворотніми. Напрямом наведених

хімічних реакцій залежить від температури і визначається константами рівноваги (рис. 2.2.1).

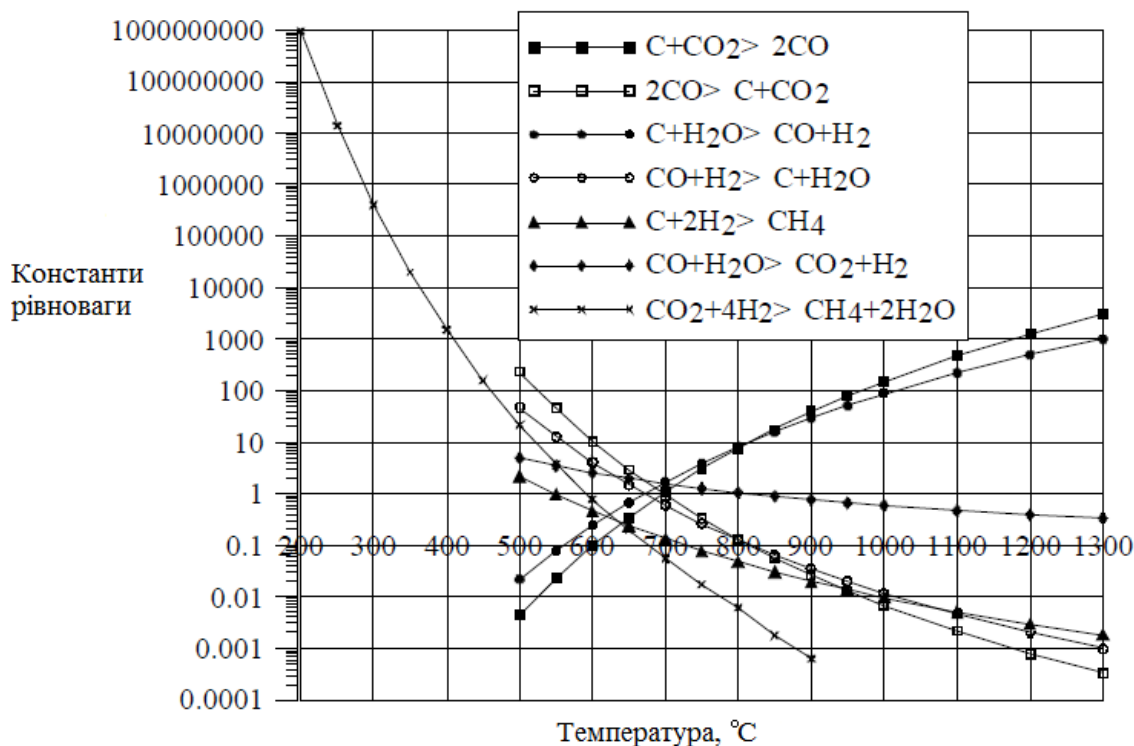


Рис. 2.2.1 – Температурні залежності констант рівноваги основних реакцій газифікації вуглецевого матеріалу водяною парою

За повного випаровування вологи з верхніх шарів подинної, прикержової і бокової теплоізоляції процес газифікації кержової коксової пересипки завершується.

При досягненні у шарах теплоізоляційної шихти, що вміщують дерев'яну тирсу, температур вище 250 °C відбувається процес піролізу, що супроводжується виділенням теплоти. Подальший нагрів печі супроводжується хімічними реакціями відновлення оксидів металів, що знаходяться в теплоізоляційній шихті. Реакції (2.2.10) – (2.2.15) є ендотермічними і відбуваються при високих рівнях температур теплоізоляційної шихти. У зв'язку з високим вмістом піску в теплоізоляційній шихті основною реакцією відновлення оксидів металів є реакція (2.2.10), що відбувається при температурах більше ніж 1670 °C.

У відповідності з вище викладеною фізичною моделлю розробимо математичну модель фізичних полів печі Ачесона в процесі графітування електродних заготовок.

Розроблена математична модель ґрунтується на системі рівнянь тепло- та електропровідності, механічного руху і рівноваги на базі моделі Дракера-Прагера, розробленої для сипких матеріалів, і описує теплоелектричний і механічний стан печі з врахуванням контактних взаємодій теплоелектричної і механічної природи на межі сипкий матеріал – тверде тіло.

Відмінною особливістю розробленої математичної моделі є врахування вищезазначених механізмів переносу вологи і пари, переносу теплоти за рахунок реакцій газифікації керованої коксової пересипки, конверсії окису вуглецю і водню в теплоізоляційній шихті, а також теплоти піролізу деревини, що відбуваються в печі.

Систему диференціальних рівнянь фізичних полів печі Ачесона з використанням механічної моделі сипкого середовища Дракера-Прагера можна записати наступного вигляду:

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial \tau} = \nabla \cdot [\lambda_{eff}(p, T) \nabla T(X)] + \chi(p, T) |\nabla U(X)|^2 + q_{V,chem} + q_{V,devapor}; \\ \nabla \cdot [\chi(p, T) \nabla U(X)] = 0; \\ \nabla \cdot \dot{\sigma} \cdot \dot{f} = 0, \end{cases} \quad (2.2.13)$$

де $H = \int_{T_{ref}}^T c_p^{eff}(T) \rho(T) dT$ – ентальпія, в якій враховується теплота випаровування чи конденсації вологи у вологовмістних матеріалах печі, Дж/ м³; $X(x, y, z) \in R^3$ – декартова система координат, м;

$$c_p^{eff}(T) = \begin{cases} c_{p-0}^*(T), T < T_{eqL}; \\ \frac{c_{p-0}^*(T_{eqL}) + c_{p+0}^*(T_{eqR})}{2} + \frac{L_{fm}}{\Delta T}, T_{eqL} \leq T \leq T_{eqR}; \\ c_{p+0}(T), T > T_{eqR}, \end{cases} \quad \text{– ефективна масова}$$

ізобарна теплоємність, що враховує в матеріалах, що містять вологу теплоємність води і теплоту її пароутворення, а в матеріалах, що підлягають графітації, - теплоту сублімації графіту при високих температурах, Дж/ (кг·К);

$T_{eqL} = T_{eq} - \frac{\Delta T}{2}$; $T_{eqR} = T_{eq} + \frac{\Delta T}{2}$; T_{eq} – рівноважна температура випаровування, сублімації (фазового переходу першого роду) чи хімічної реакції, К; ΔT – температурний інтервал згладжування, К; c_{p-0}^* – масова теплоємність матеріалу з врахуванням його вологовмісту, Дж/ (кг·К);

$L_{fm} = \begin{cases} \alpha_B L_{fB} - \text{при випаровуванні води;} \\ (1 - \alpha_B) L_{fC} - \text{при сублімації графіту;} \end{cases}$ – масова теплота при фазових переходах першого роду, Дж/ кг; α_B – масова частка води у вологому матеріалі; L_{fB}, L_{fC} – масова теплота фазового переходу при випаровування води і сублімації графіту, відповідно, Дж/ кг; q_{Vchem} – густина внутрішнього джерела теплоти, пов'язана з хімічними реакціями 2.2.10 – 2.2.15, 2.2.1 – 2.2.12 і піролізом деревини, Вт/ м³; $q_{V,devapor}$ – густина внутрішнього джерела теплоти, що враховує тепломасоперенос водяної пари і її конденсацію, Вт/ м³; $\dot{\sigma}, \dot{f}$ – похідні по часу тензора напруги другого рангу і вектору об'ємних сил, пов'язаного з графітацією, відповідно; τ – час, с.

Ентальпія, що враховує вологовміст теплоізоляції, керованої пересипки і теплоти сублімації вуглецевовмісних матеріалів печі Ачесона з врахуванням вищенаведеної залежності $c_p^{eff}(T)$, визначається наступним чином:

$$H = \int_0^{T_{eqL}} c_{p-0}^*(T) \rho_{-0}^*(T) dT + \frac{[c_{p-0}^*(T_{eqL}) \rho_{-0}^*(T_{eqL}) + c_{p+0}^*(T_{eqR}) \rho_{+0}^*(T_{eqR})]}{2} \Delta T + L_{fv} + \int_{T_{eqR}}^{T > T_{eqR}} c_{p+0}(T) \rho_{+0}(T) dT, \quad (2.2.14)$$

де c_{p-0}^*, ρ_{-0}^* і c_{p+0}, ρ_{+0} – властивості матеріалів по обидві сторони від температурного фазового переходу (з врахуванням вологовмісту), відповідно;

$L_{fv} = \begin{cases} \alpha_B \rho_B L_{fB} - \text{при випаровуванні води;} \\ (1 - \alpha_B) \rho_G L_{fC} - \text{при сублімації графіту;} \end{cases}$ – об'ємна теплота при фазових переходах першого роду, Дж/ м³; ρ_B, ρ_G – густина води і графіту, відповідно, кг/ м³.

Ефективна теплопровідність матеріалів з врахуванням вологовмісту визначається залежністю

$$\lambda_{eff}(p, T) = \begin{cases} \lambda_{-0}(p, T), T < T_{eqL}; \\ \lambda_{-0}(p, T_{eqL}) + \frac{\lambda_{+0}(p, T_{eqR}) - \lambda_{-0}(p, T_{eqL})}{\Delta T} T, T_{eqL} < T < T_{eqR}; \\ \lambda_{+0}(p, T), T > T_{eqR}, \end{cases} \quad (2.2.15)$$

де λ_{-0} і λ_{+0} – теплопровідність матеріалу по обидві сторони від температури фазового переходу, відповідно, Вт/ (м·К).

Густина внутрішнього джерела теплоти, пов'язана з хімічними реакціями при газифікації коксової кернової пересипки, описується співвідношенням

$$q_{Vchem} = \frac{Q_{r.g} m_{vapor}}{V_{gasific} \tau_{gasific}} \quad (2.2.16)$$

де $Q_{r.g}$ - тепловий ефект реакції газифікації, Дж/ кг; m_{vapor} - маса пари, що вступила у реакцію газифікації, кг; $V_{gasific}$ - об'єм зони газифікації, м³; $\tau_{gasific}$ - тривалість процесу газифікації, с.

За умови, що основною реакцією процесу газифікації є реакція «водяного газу» (2.2.1), величини $Q_{r.g}$ визначається по (2.2.17), а m_{vapor} - по (2.2.18).

$$Q_{r.g} = (-7165100 - 718,25T + 0,1162T^2 + 0,00007903T^3), \quad (2.2.17)$$

$$m_{vapor} = 1,5m_c = 1,5 \min \left(k e^{-\frac{E}{RT}} m_{Cgasif} \tau_{gasific}, 0,6667 m_{all.vapor} \right) \quad (2.2.18)$$

де T - середньомасова температура вуглецю в зоні газифікації, К; m_c - маса вуглецю, що вступив у реакцію газифікації, кг; k - передекспоненційний множник, с⁻¹; E - енергія активації, Дж/ моль; R - газова стала, Дж/ (моль·К); m_{Cgasif} - маса вуглецю в зоні газифікації, кг; $m_{all.vapor}$ - маса водяної пари, що пройшла через зону газифікації, кг.

Для процесу газифікації кернової коксової пересипки можна прийняти, що $k = 833,33 \text{ с}^{-1}$, $E = 133,2 \text{ Дж/ моль}$, а m_{Cgasif} як масу кернової коксової пересипки з температурою більше 600°C.

Густина внутрішнього джерела теплоти, пов'язана з хімічними реакціями конверсії окису вуглецю і водню в теплоізоляційній шихті(в основному реакція гідрування оксиду вуглецю (2.2.6), у спрощеному вигляді можна визначити як

$$\begin{aligned} q_{V,chem} &= \frac{Q_{CH_4} m_{CO}}{V_{convers} \tau_{convers}} k_{evac.g} = \frac{Q_{CH_4} \frac{1}{3} \cdot \frac{28 \cdot 2}{2 \cdot 18} m_{vapor}}{V_{convers} \tau_{convers}} k_{evac.g} \approx \\ &\approx \frac{Q_{r.g} m_{vapor}}{V_{convers} \tau_{convers}} k_{evac.g} \end{aligned} \quad (2.2.19)$$

де $k_{evac.g}$ - коефіцієнт. Що враховує евакуацію окису вуглецю і водню в навколишнє середовище; Q_{CH_4} - тепловий ефект реакції (2.2.6), Дж/ кг; m_{CO} - маса окису вуглецю, що вступив у реакцію утворення метану (6); $V_{convers}$ - об'єм зони конверсії окису вуглецю і водню в теплоізоляції, м³; $\tau_{convers}$ - тривалість процесу конверсії окису вуглецю і водню в теплоізоляційній шихті, с.

Густина внутрішнього джерела теплоти, що враховує теплоту піролізу деревини, визначається наступною залежністю

$$q_{Vchem} = \frac{Q_{p.w}m_w}{V_w\tau_w} \quad (2.2.20)$$

де $Q_{p.w}=1150 \cdot 10^3$ Дж/ кг – тепловий ефект реакцій піролізу деревини; m_w – маса деревини, що вступила в реакцію піролізу, кг; V_w - об'єм зони піролізу, м³; τ_w - тривалість процесу піролізу, с.

Масу деревини, що вступила в реакцію піролізу, можна визначити знаючи швидкість реакції

$$m_w = k e^{-\frac{E}{RT}} m_{all.w} \tau_w; \quad (2.2.21)$$

де $k = 36300$ – передекспоненційний множник, с⁻¹; $E = (55-110) \cdot 10^3$ Дж/ моль – енергія активації; T – середньомасова температура зони піролізу, К; $m_{all.w}$ – маса деревини в зоні піролізу, кг.

Густина внутрішнього джерела теплоти, що враховує масо перенос водяної пари і її конденсацію, визначається залежністю

$$q_{V,devapor} = \frac{m_{vapor} L_{fb} k_{evac.p}}{V_{cond} \tau_{cond}} \quad (2.2.22)$$

де m_{vapor} – маса вологи, що випарувалася, кг; $k_{evac.p}$ – коефіцієнт, що враховує евакуацію пари в оточуюче середовище; V_{cond} – об'єм зони конденсації пари, м³; τ_{cond} – тривалість процесу конденсації, с.

У відповідності х інкрементною теорією пластичності непружні деформації ($\dot{\epsilon}_{ij}^{in}$) розглядаються як початкові. Тоді похідна по часу тензору напруги $\dot{\sigma}_{ij}$ (2.2.13) виражається законом Гука, записаним через початкові напруги і повну деформацію ($\dot{\epsilon}_{ij}$)

$$\dot{\sigma}_{ij} = 2G\dot{\varepsilon}_{ij} + \frac{2G\nu}{1-2\nu}\dot{\varepsilon}_{kk}\delta_{ij} - \dot{\sigma}_{ij}^{\text{in}}, \quad i, j = \overline{1,3},$$

де $\dot{\sigma}_{ij}^{\text{in}} = 2G\dot{\varepsilon}_{ij}^{\text{in}} + \frac{2G\nu}{1-2\nu}\dot{\varepsilon}_{kk}\delta_{ij} + \frac{1+\nu}{1-2\nu}\beta\delta_{ij}\dot{T}$, $i, j = \overline{1,3}$ – компоненти початкових напруг, Па; $\dot{\varepsilon}_{ij} = 0,5(\dot{u}_{i,j} + \dot{u}_{j,i}) = \dot{\varepsilon}_{ij}^{\text{el}} - \dot{\varepsilon}_{ij}^{\text{in}}$, $i, j = \overline{1,3}$ – тензор повної швидкості деформації; \dot{u}_i , $i = \overline{1,3}$ – вектор шв-идкості переміщення, м; $\dot{\varepsilon}_{ij}^{\text{el}}$ – пружна і $\dot{\varepsilon}_{ij}^{\text{in}} = \dot{\varepsilon}_{ij}^{\text{pl}} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{\text{T}}$ – непружна частини тензору повної швидкості деформації; $\dot{\varepsilon}_{ij}^{\text{pl}}$; $\dot{\varepsilon}_{ij}^{\text{T}}$ – тензори швидкості пластичної і температурної деформації, відповідно; $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ – пружний модуль зсуву, Па; E – модуль пружності при розтягу, Па; ν – коефіцієнт Пуассона; δ_{ij} – символ Кронекера; β – коефіцієнт лінійного температурного розширення, K^{-1} .

Врахування залежності електропровідності і теплопровідності сипких матеріалів керованої пересипки і теплоізоляції печі Ачесона від тиску, пов'язаного з гравітаційним і температурним навантаженням, відбувається за допомогою моделі Дракера-Прагера, що застосовується для опису механічного стану сипучих матеріалів. У відповідності з моделлю Дракера-Прагера еквівалентна напруга визначається співвідношенням

$$\sigma_{ekv} = \beta I_1 + \sqrt{J_2}, \quad (2.2.23)$$

де $\beta = \frac{2\sin\varphi}{\sqrt{3}(3-\sin\varphi)}$ – константа сипкого матеріалу; φ – кут внутрішнього тертя, рад;

$J_2 = \frac{1}{2}S_{ij}S_{ij}$ – другий інваріант тензору девіацій напруг, Па^2 ; $S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3}I_1\delta_{ij}$, $i, j = \overline{1,3}$ – тензор девіаторних напруг, Па; $I_1 = \sigma_{kk}$, Па.

Границя текучості сипучого матеріалу визначається залежністю

$$\sigma_{\text{yield-str}} = \frac{6cc\cos\varphi}{\sqrt{3}(3-\sin\varphi)}, \quad (2.2.24)$$

де c – величина зчеплення між частинками сипкого матеріалу, Па.

Враховуючи (2.2.23) та (2.2.24), критерій текучості сипкого матеріалу можна записати у вигляді

$$F = \beta I_1 + \sqrt{J_2} - \sigma_{\text{yield-str}}. \quad (2.2.25)$$

В результаті рішення системи (2.2.13) з врахуванням критерію текучості (2.2.25) визначається тензор напруг и середня гідростатична напруга $\sigma_m = \frac{1}{3} I_1$ в сипкому матеріалі. Після чого розподіл тиску в сипкому матеріалі знаходиться як $p = \sigma_m - p_{var}(T)$, де p_{var} – тиск випареної вологи сипких матеріалів.

Початкові умови при $\tau = 0$:

$$\begin{cases} T = 0 \\ U = 0 \\ \dot{\sigma}_{ij}^{in} = 0, \quad i, j = \overline{1, 3} \end{cases} \quad (2.2.26)$$

Граничні умови при $\tau > 0$:

– на торцях струмопідводів печі

$$J_n(\tau)|_{shunt} = \mathbf{n} \cdot (-\chi(p, T) \nabla U) \cup U|_{shunt} = U(\tau); \quad (2.2.27)$$

– на зовнішніх поверхнях печі, що межують з оточуючим середовищем

$$\begin{cases} \mathbf{n} \cdot (-\lambda(p, T) \nabla T) = \alpha_{eff}(T)(T - T_{env}); \\ \mathbf{n} \cdot \nabla U = 0; \\ \dot{\sigma} \cdot \mathbf{n} = 0; \\ \mathbf{u}(\chi) = 0, X \in X_0, \end{cases} \quad (2.2.28)$$

де $X_0(0, 0, 0)$ – початок координат печі, м;

– на осях симетрії печі

$$\begin{cases} \mathbf{n} \cdot \nabla T = 0; \\ \mathbf{n} \cdot \nabla U|_{axes \perp j} = 0 \wedge U|_{axes \perp j} = 0 \\ \mathbf{n} \cdot \nabla \mathbf{u} = 0, \end{cases} \quad (2.2.28)$$

де \mathbf{j} – вектор густини електричного струму, А/ м²;

– умови теплоелектричного контакту на ГК між елементами конструкції печі

$$\begin{cases} \{T\} = \mathbf{n} \cdot (r_\lambda \mathbf{q}); \\ \{\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}\} = 0; \\ \{U\} = \mathbf{n} \cdot (r_e \mathbf{j}); \\ \{\mathbf{n} \cdot \mathbf{j}\} = 0; \end{cases} \quad 2.2.30)$$

– умови механічного контакту на ГК між стінками печі, заготовками і сипкими матеріалами теплоізоляції і керованої пересипки (2.2.31) і на інших ГК між елементами конструкції печі (2.2.32)

$$\begin{cases} \mathbf{n}^+ \dot{\mathbf{u}}^+ + \mathbf{n}^+ \dot{\mathbf{u}}^- - \delta \leq 0; \\ \{\dot{\sigma} \cdot \mathbf{n}\} \leq 0; \\ (\mathbf{n}^+ \dot{\mathbf{u}}^+ + \mathbf{n}^+ \dot{\mathbf{u}}^- - \delta) \dot{\sigma} \cdot \mathbf{n} = 0; \\ |\dot{\sigma}_\tau| \leq -f \dot{\sigma} \cdot \mathbf{n}; \end{cases} \quad (2.2.31)$$

$$\begin{cases} \{\dot{\mathbf{u}}\} = 0; \\ \{\dot{\sigma} \cdot \mathbf{n}\} = 0, \end{cases} \quad (2.2.32)$$

де δ – початковий проміжок по нормалі до поверхней, з якими контактують, м; $\dot{\sigma} \cdot \mathbf{n}$ – похідні по часу нормальної напруги на поверхні контакту, Па; $\dot{\sigma}_\tau$ – похідні по часу тангенційної складової напруг, Па; f – коефіцієнт сухого тертя; $\{\dot{\mathbf{u}}\} = \dot{\mathbf{u}}^+ - \dot{\mathbf{u}}^-$; $\{\dot{\sigma} \cdot \mathbf{n}\} = \dot{\sigma}^+ \cdot \mathbf{n}^+ - \dot{\sigma}^- \cdot \mathbf{n}^+$.

Перша нерівність (2.2.31) є умовою взаємного непроникнення тіл і пов'язано з силовим співвідношенням – друга нерівність (2.2.31), оскільки закриття проміжку викликає появу контактної напруги. Третя нерівність (2.2.31) відповідає нульовим контактним напругам, що викликає роз'єднання контактуючих тіл. Четверта нерівність (2.2.31) описує умови фракційної взаємодії тіл у формі закону Амонтона-Кулона.

Граничні умови (2.2.32) описують умови абсолютного механічного контакту між твердими тілами.

Методика чисельного рішення

Математична модель (2.2.13) – (2.2.32) потребує рішення з п'яти рівнянь і при цьому дає змогу враховувати такі основні фактори, що визначають формування поля температур в керні, як масоперенос вологи і залежність від тиску і температури електропровідності пересипки печі. Також математична постановка (2.2.13) – (2.2.32) дає можливість розраховувати напружено-деформовані стани (НДС), що огорожують конструкції печі, і, таким чином, оцінювати довговічність роботи конструкції, наприклад, крихких графітових

струмопідводів печі, як найбільш слабкого, в сенсі експлуатаційної надійності частини обладнання.

Основним критерієм оцінки достовірності отриманих результатів за допомогою математичної моделі є їх верифікація на даних натурних експериментів, що отримуються в промислових умовах на діючому пічному обладнанні.

Для чисельного рішення сформульованої задачі (2.2.13) – (2.2.32) використовується метод скінченних елементів (МСЕ), що отримав найбільше застосування для рішення широкого класу наукових та інженерних задач.

З аналізу системи рівнянь (2.2.13) видно, що перше рівняння є нестационарним, а два інших квазістационарними. Таким чином, на розподіл поля температур в поточний момент часу здійснює вплив його розподіл в попередні моменти часу, в той час, як розподіл полів електричного потенціалу і механічних напруг формується миттєво, тобто не залежить від розподілу цих полів в попередні моменти часу. Основним джерелом нагріву печі Ачесона є джоулева теплота, що виділяється за рахунок проходження електричного струму через kern. Другим, за значимістю джерелом теплоти, є теплота хімічних реакцій конверсії водяної пари в kernовій пересипці і окису вуглецю і водню в теплоізоляції.

У відповідності з (2.2.13) значення джоулевої теплоти, що виділяється в kernі, залежить від квадрату напруженості електричного поля ($E = -\nabla U$, В/м) і електропровідності матеріалів, яка в свою чергу залежить від температури і тиску. З експериментальних даних по двопараметричній залежності електропровідності $\chi(T, p)$ пересипочних вуглецевих матеріалів випливає, що в межах зміни робочої температури та тиску в сипких вуглецевих матеріалах печі Ачесона залежність електропровідності від зміни температури набагато більша, ніж від тиску.

Зауваження, наведені вище, дають можливість спростити методику чисельного рішення нелінійної системи рівнянь (2.2.13), шляхом її розділення на 2-ві більш прості задачі з використанням ітераційних процесів нижнього рівня на

основі лінеаризації по методу Ньютона для вирішення кожної задачі. Через високу температурну залежність електропровідності сипких матеріалів від температури нелінійну теплоелектричну задачу (перші два рівняння (2.2.13)) необхідно вирішувати як зв'язану задачу, а нелінійну механічну задачу (третє рівняння (2.2.13)) можна вирішувати окремо від першої як незв'язану. При цьому для отримання рішення всієї системи рівнянь (2.2.13) можна використовувати ітераційний процес верхнього рівня на основі методу послідовних наближень. Зв'язок між рішеннями цих двох задач може бути наступним: вхідним параметром для механічної задачі буде температури, отримана з рішення першої теплоелектричної задачі, а середня гідростатична напруга чи тиск сипкого шару, отримані з рішення механічної задачі, будуть вхідним параметром для першої задачі, по якій уточнюється електропровідність і теплопровідність сипкого матеріалу.

У відповідності з прийнятими позначеннями МКЕ систему рівнянь теплоелектричної задачі для (2.2.13) можна записати у дискретному вигляді наступним чином:

$$\begin{bmatrix} [c^{(e)}] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{H}(\hat{T})\} \\ \{\dot{U}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [k_{\lambda}^{(e)}] + [k_{\alpha}^{(e)}] \alpha_{\text{eff}}(\hat{T}) & [0] \\ [0] & [k_U^{(e)}(\hat{T})] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\hat{T}\} \\ \{U\} \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} \{f\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} \quad (2.2.33)$$

де $[c^{(e)}] = \int_V [N]^T [N] dV$ – матриця демпфування; $[N]$ – матриця коефіцієнтів функцій форми кінцевого елемента; $\dot{H}(\hat{T})$ – похідна по часу від ентальпії, Дж/(м³·с); \hat{T} – означає, що функція (температура) відноситься до верхнього рівня; $[k_{\lambda}^{(e)}] = \int_V [B]^T [\lambda_{\text{eff}}(p, \hat{T})] [B] dV$ – матриця теплопровідності елемента; $[B] = \nabla\{T\}$; V – об'єм кінцевого елемента, м³; \dot{U} – похідна по часу від електричного

потенціалу, В/с; $[\lambda_{\text{eff}}(p, \hat{T})] = \begin{bmatrix} \lambda_{xx}(p, \hat{T}) & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{yy}(p, \hat{T}) & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{zz}(p, \hat{T}) \end{bmatrix}$ – матриця

ефективної теплопровідності анізотропного матеріалу, Вт/(м·К); $[k_U^{(e)}(\hat{T})] = \int_V [B]^T [\chi(p, \hat{T})] [B] dV$ – матриця електропровідності елемента; $[\chi(p, \hat{T})] = \begin{bmatrix} \chi_{xx}(p, \hat{T}) & 0 & 0 \\ 0 & \chi_{yy}(p, \hat{T}) & 0 \\ 0 & 0 & \chi_{zz}(p, \hat{T}) \end{bmatrix}$ – матриця електропровідності анізотропного матеріалу, (Ом·м)⁻¹; $\{f\} = - \int_V ([\chi(p, \hat{T})] \{\nabla U\} \{\nabla U\} [N]^T + q_{V, \text{chem}}) dV - T_{\text{env}} \int_{S_2} \alpha_{\text{eff}}(\hat{T}) [N^{(e)}]^T dS + \int_{S_1} q^{(e)} [N]^T dS$ – вектор вільних членів рівняння теплопровідності, пов'язаний з джерелом теплоти і граничними умовами 2, 3-го роду, в якому $[\chi(p, \hat{T})] \{\nabla U\} \{\nabla U\}$ – густина внутрішнього джерела теплоти в елементі, що викликана протіканням електричного струму (у відповідності з законом Джоуля-Ленца), а $q_{V, \text{chem}}$ – хімічними реакціями, Вт/м³; $\{\nabla U\} = \{E\} = [B] \{U\}$ – градієнт чи напруженість електричного поля, В/м; S_1, S_2 – поверхні, на яких задані граничні умови 2 і 3-го роду, відповідно; q – густина теплового потоку в граничних умовах 2-го роду, Вт/м².

Для заміни першої похідної за часом в (2.2.33) використовується її кінцеворізницевий аналог – абсолютно стійка неявна різницева схема з першим порядком апроксимації за часом $O(\Delta\tau)$. Тут $\Delta\tau$ – крок інтегрування за часом, с.

Після лінеаризації (2.2.33) по температурі за методом Ньютона, отримаємо:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{e=1}^M ([k_\lambda^{(e)}] (\frac{\partial \lambda^{(e)}(p, T^k)}{\partial T} \{T^k\} + \lambda^{(e)}(p, T^k)) + \\ + [k_\alpha^{(e)}] (\frac{\partial \alpha(T^k)}{\partial T^k} \{T^k\} + \alpha(T^k)) + [c^{(e)}] \left\{ \frac{c_p^{(e)}(T^k) \rho^{(e)}(T^k)}{\Delta\tau} \right\} \{ \delta T^{k+1} \} = \\ = - \sum_{e=1}^M \{f^{(e)}\} - \sum_{e=1}^M ([k_\lambda^{(e)}] \lambda^{(e)}(p, T^k) + [k_\alpha^{(e)}] \alpha(T^k)) \{T^k\} + \\ + [c^{(e)}] \left\{ \frac{H^e(T^{k+1}) - H^e(T^k)}{\Delta\tau} \right\}); \\ \sum_{e=1}^M ([k_U^{(e)}] (\frac{\partial \chi^{(e)}(p, T^k)}{\partial T} \{T^k\} + \chi^{(e)}(p, T^k)) \{ \delta U^{k+1} \} = \\ = - \sum_{e=1}^M ([k_U^{(e)}] \chi^{(e)}(p, T^k)) \{U^k\}, \end{array} \right. \quad (2.2.34)$$

де $[k_\lambda^{(e)}] = [k_U^{(e)}] = \int_V [B]^T [B] dV$, $[k_\alpha^{(e)}] \int_{S_2} [N]^T [N] dS$ – матриці теплопровідності, електропровідності (чи жорсткості) і зовнішнього конвективного теплообміну, відповідно, розраховуються при $\lambda=\chi=\alpha=1$ для ізотропного випадку; k – номер ітерації.

Система рівнянь (2.2.34) на кожній ітерації вирішується відповідно до невідомих δT і δU . Шукана температура і електричний потенціал визначаються залежностями:

$$\{T^{k+1}\} = \{T^k\} + \{\delta T^{k+1}\}; \quad (2.2.35)$$

$$\{U^{k+1}\} = \{U^k\} + \{\delta U^{k+1}\}.$$

При формі запису системи рівнянь типу (2.2.34) матриці жорсткості, зовнішнього теплообміну і демпфування необхідно розраховувати лише один раз на початку виконання розрахунків. Методика (2.2.34), (2.2.35) є ефективною при рішенні задач з фазовими переходами в узагальненій постановці (2.2.13). Для дискретизації $\Omega \in R^3$ використовується чотирьох- і шестигранні лінійні елементи з 4-ма і 8-ма вузлами. Система лінеаризованих рівнянь вирішується методом Гауса з урахуванням лінійної структури матриці чи методом Гауса-Зейделя.

Для розрахування матриць МКЕ при дискретизації розрахункової області 4-х вузловими тетраедрами застосовується аналітичне інтегрування, а при 8-ми вузловій гексагедронами – послідовне чисельне інтегрування з використанням квадратурних формул Гауса 3-го порядку точності, наприклад, для матриці жорсткості маємо

$$\begin{aligned} [k_\lambda^{(e)}] &= \int_V [B]^T [B] dV = \iiint_{-1}^1 [B]^T [B] |\det[J]| d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3 = \\ &= \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 f(\xi_i, \xi_j, \xi_k) \eta_i \eta_j \eta_k, \end{aligned} \quad (2.2.36)$$

де $f(\xi_i, \xi_j, \xi_k) = [B]^T [B] |\det[J]|$; ξ, η – вузли і ваги квадратичної формули Гауса.

При вирішенні теплоелектричних задач з контактною взаємодією методами МКЕ можна застосовувати як точні формулювання, так і спрощені. В останньому випадку для спрощення побудови складних чисельних моделей можна застосовувати наближення, основане на заміні контактних поверхонь на тонкі шари з ефективними коефіцієнтами, що застосовувалось у багатьох інженерних розрахунках. Ефективна теплопровідність тонкого шару товщиною δ визначається як $\lambda_{\text{eff}} = \delta / r_\lambda$, а ефективна теплопровідність – $\chi_{\text{eff}} = \delta / r_\epsilon$. При цьому зберігається схема наскрізного розрахунку потенціальних полів, властивих МКЕ.

Для задання достовірних граничних умов при проведенні чисельних експериментів по визначенню теплоелектричного стану печей графітування змінного струму розроблений оригінальний метод експериментально-розрахункового визначення втрат електроенергії до входу у піч.

Чисельне рішення задачі термopружності, яка описується третім рівнянням системи (2.2.13) разом з умовами моделі Дракера-Прагера (2.2.23) – (2.2.25), законом Гука (2.2.22) і граничними умовами (2.2.28) – (2.2.32). У відповідності з інкрементарною теорією пластичної течії базується на рішенні задачі механіки в початкових напруженнях. В цьому випадку основою при ітераційному рішенні задач пластичності є рішення пружної задачі на кожному кроці виконання ітерацій. Система дискретних рівнянь МКЕ для задачі термopружності, отримана шляхом мінімізації функціоналу повної потенційної енергії має вигляд

$$\sum_{e=1}^M ([k^{(e)}] \{U_d\}) = - \sum_{e=1}^M \{f^{(e)}\}, \quad (2.2.37)$$

де M – кількість кінцевих елементів; $[k^{(e)}] = \int_V [B^{(e)}]^T [D] [B^{(e)}] dV$ – матриця жорсткості елементу; $[B]$ – матриця градієнтів, що пов'язує деформації і переміщення; $[D]$ – матриця пружних характеристик матеріалу; $\{U_d\}$ – вектор вузлових переміщень елементу; $\{f^{(e)}\} = - \int_V [N^{(e)}]^T \{G\} dV - \int_V [B^{(e)}]^T [D] \{\epsilon_0^{(e)}\} dV - \int_S [N^{(e)}]^T \{p\} dS$; $[N^{(e)}]$ – матриця функцій форми елементу; $\{G\}$ – вектор об'ємних гравітаційних сил елементу; $\{\epsilon_0^{(e)}\}$ – початкова деформація

елементу, пов'язана з температурним навантаженням; $\{p\}$ – вектор поверхневого навантаження на елемент.

Дискретизація розрахункової області $\Omega \in R^3$ для задачі (2.2.37) така сама, як і для теплоелектричної задачі, викладеної вище. Для розрахунку інтегральних співвідношень МКЕ системи рівнянь (2.2.37) і наступного її рішення застосовується чисельна методика теплоелектричної задачі. Після рішення системи (2.2.37) при заданих ГУ визначається поле вузлових переміщень. Вектори переміщень $\{u\}$, пружних деформацій $\{\varepsilon\}$ і напружень $\{\sigma\}$ в кінцевих елементах визначаються наступними співвідношеннями:

$$\{u\} = [N]\{U_d\}; \quad (2.2.38)$$

$$\{\varepsilon\} = [B]\{U_d\}; \quad (2.2.39)$$

$$\{\sigma\} = [D](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}). \quad (2.2.40)$$

Для врахування початкових напружень $\{\sigma_0\}$ вектор напружень елемента визначається за наступною формулою

$$\{\sigma\} = [D](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}) + \{\sigma_0\}. \quad (2.2.41)$$

При чисельному рішенні нелінійної задачі пластичності для сипких матеріалів, що підлягають неасоціативному закону течії, використовується методика, викладена у роботах Simo і Taylor [51], що базується на лінеаризації за методом Ньютона.

Після отримання розрахункових даних по фізичним полям печі Ачесона виконується розрахунок її енергобалансу. Результируючий енергобаланс печі графітування, у якій підтримується температурний регламент технологічного процесу за рахунок підведення електроенергії, можна записати наступним рівнянням

$$Q_{\varepsilon/\varepsilon} + Q_{\text{хим}}^{\text{энд}} = Q_{\text{заг}} + Q_{\varepsilon/\varepsilon}^{\text{пот}} + Q_{\text{нагр}}^{\text{тпиогр.эл}} + Q_{\text{хим}}^{\text{экз}} + Q_{\text{в}}^{\text{исп}} + Q_{\text{т.пот}} + Q_{\text{отх.г}}, \quad (2.2.42)$$

де $Q_{\varepsilon/\varepsilon} = \frac{1}{\Delta\tau_{\text{т.пр}}} \int_0^{\Delta\tau_{\text{т.пр}}} U_{\text{д.з.}}(\tau) I_{\text{д.з.}}(\tau) d\tau$ – теплота від електроенергії, підведеної до печі по високій стороні електроживлячого обладнання, Вт; $\Delta\tau_{\text{т.пр}}$ – тривалість технологічного процесу графітування електродних заготовок (або кампанії печі), с; $U_{\text{д.з.}}$, (В), $I_{\text{д.з.}}$, (А) – діючі значення напруги і сили струми по високій стороні електроживлення печі, відповідно; $Q_{\text{хим}}^{\text{энд}}$ – теплота від хімічних окисних реакцій,

кВт; $Q_{\text{заг}} = V_{\text{заг}} \int_0^{\Delta\tau_{\text{т.пр}}} \left[\int_{T_{\text{ref}}}^T c_{p\text{ заг}}(T) \rho_{\text{заг}}(T) dT - H_{\text{заг}}(T_{\text{ref}}) \right] d\tau$ – теплота, що йде на нагрів заготовок, Вт; $V_{\text{заг}}$ – об'єм заготовок, м³; $c_{p\text{ заг}}$ – масова теплоємність заготовок, Дж/(кг·К); $\rho_{\text{заг}}$ – густина заготовок, кг/м³; $H_{\text{заг}}(T_{\text{ref}})$ – об'ємна ентальпія заготовок за початкової температури T_{ref} , Дж/м³; $Q_{\text{э/э}}^{\text{пот}}$ – втрати електроенергії до входу у піч(трансформатор, випрямляч для печей постійного струму, шинопакети і т.д.), Вт; $Q_{\text{нагр}}^{\text{тпиогр.эл}} = \sum_{i=2}^M \left\{ V_i \int_0^{\Delta\tau_{\text{т.пр}}} \left[\int_0^T c_{pi}(T) \rho_{pi}(T) dT - H_i(T_{\text{ref}}) \right] d\tau \right\}$ – теплота, що йде на нагрів теплоізоляції і обмежуючих елементів печі (тут M – кількість елементів печі, рахуючи заготовки), Вт; $Q_{\text{хим}}^{\text{экз}}$ – теплота від хімічних відновних реакцій, Вт; $Q_{\text{в}}^{\text{исп}}$ – теплота, що йде на нагрів і випаровування води, Вт; $Q_{\text{т.пот}} = \sum_{k=1}^{M_{\text{area}}} \alpha_{\text{eff}}(T)(T_k - T_{\text{env}})$ – втрати теплоти в оточуюче середовище (тут M_{area} – кількість поверхонь теплообміну печі з оточуючим середовищем), Вт; $Q_{\text{отх.г}}$ – втрати теплоти з викидними газами, що відсмоктуються димосмоком, Вт.

Рівняння для розрахунку миттєвого балансу печі можна отримати з (2.2.42) при $\Delta\tau_{\text{т.пр}} \rightarrow 1$ [50].

3. Дослідження температурного режиму процесу графітування

3.1. Режим нагрівання

Для проведення даного дослідження була використана математична модель [1]. Дослідження кампанії графітування проводилось для чотирьох типів завантажень: заготовки діаметром 400, 500, 600 мм, а також комбіноване завантаження. Останнє передбачає завантаження заготовками таким чином: у верхньому ряді – діаметром 600 мм, у середньому – 500 мм та у нижньому – 400 мм. Геометрія печі та все електро- та теплофізичні константи були реалізовані згідно [1].

Для з'ясування питання про можливість реалізації однакової програми підведення електроживлення печі графітування було проведено моделювання процесу нагрівання для всіх типів завантаження. Результати моделювання

після 22 годин нагрівання представлені на рис. 3.1.1 – 3.1.4. З наведених результатів видно, що заготовки діаметром 400 мм за цей час досягають температури до 3000 °С, що свідчить про інтенсивний процес графітування, який починається при температурі вище за 2000 °С. При комбінованому завантаженні температури заготовок нижчі, ніж у попередньому випадку, але процес графітування проходить досить інтенсивно.

Для інших типів завантаження температура заготовок знаходиться у межах 2000 – 2300 °С, що свідчить про те, що графітування або тільки починається, або ще не увійшло в інтенсивну фазу.

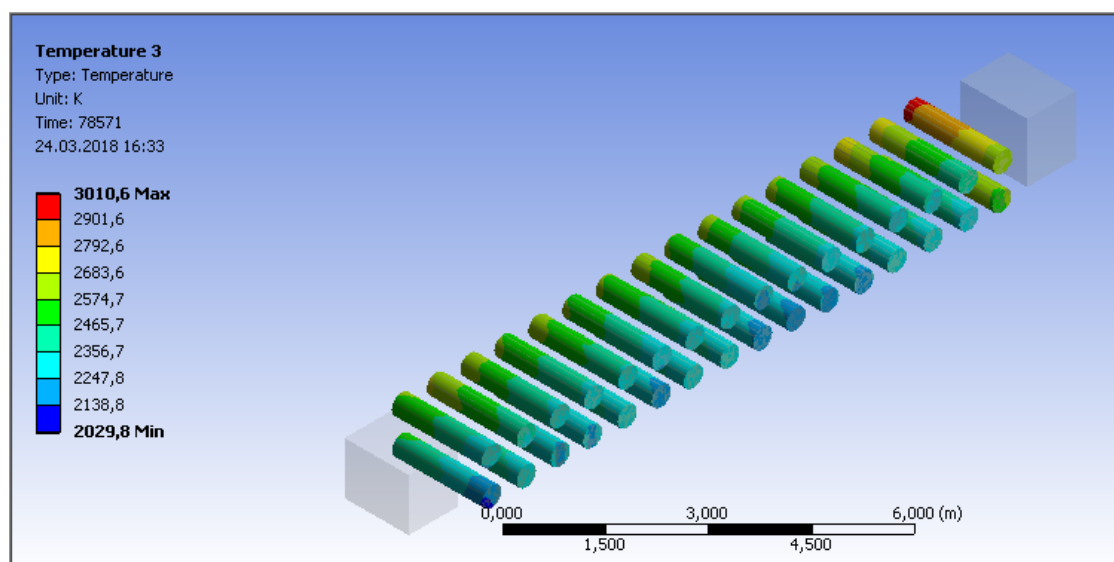


Рис. 3.1.1 – Температурні поля на розрізі печі по заготовкам кампанії графітування (діаметр виробів 400 мм.)

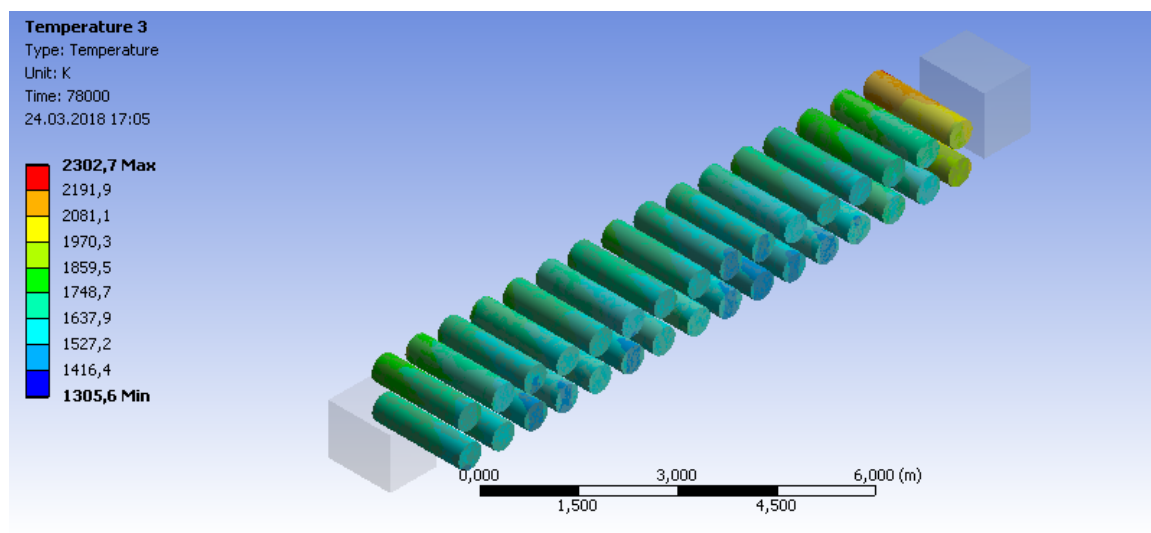


Рис. 3.1.2 – Температурні поля на розрізі печі по заготовкам (діаметр виробів 500 мм.)

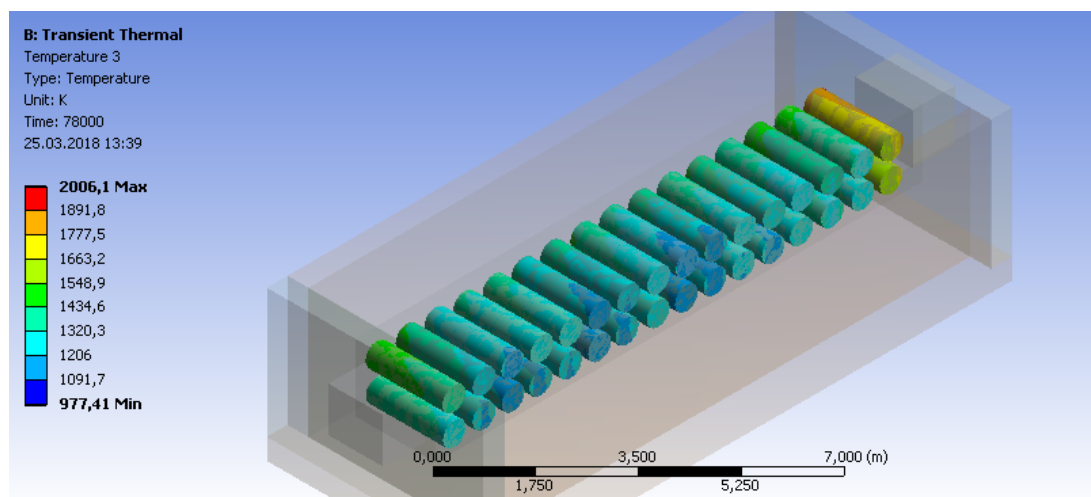


Рис. 3.1.3 – Температурні поля на розрізі печі по заготовкам (діаметр виробів 600 мм.)

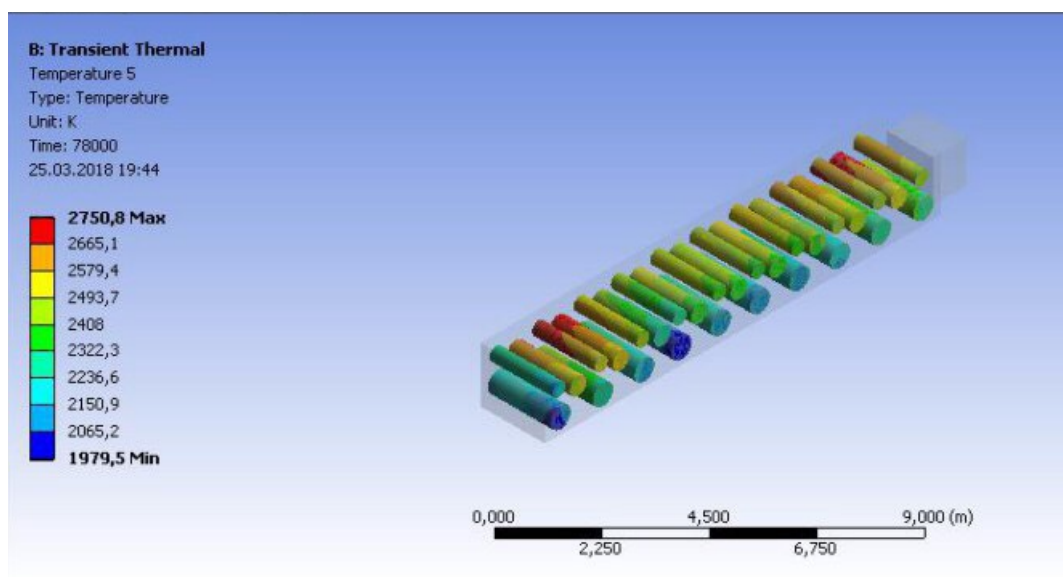
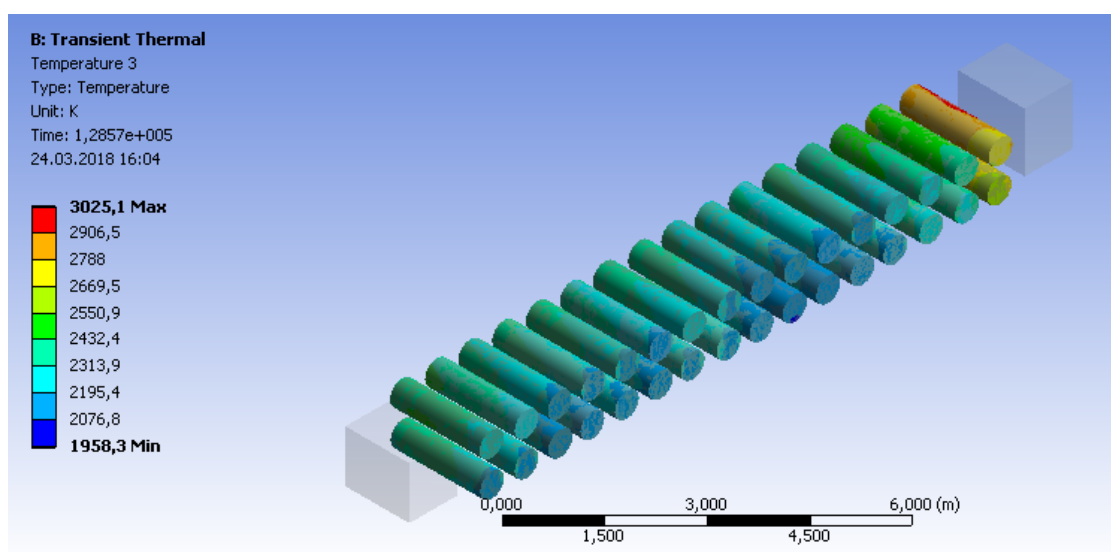
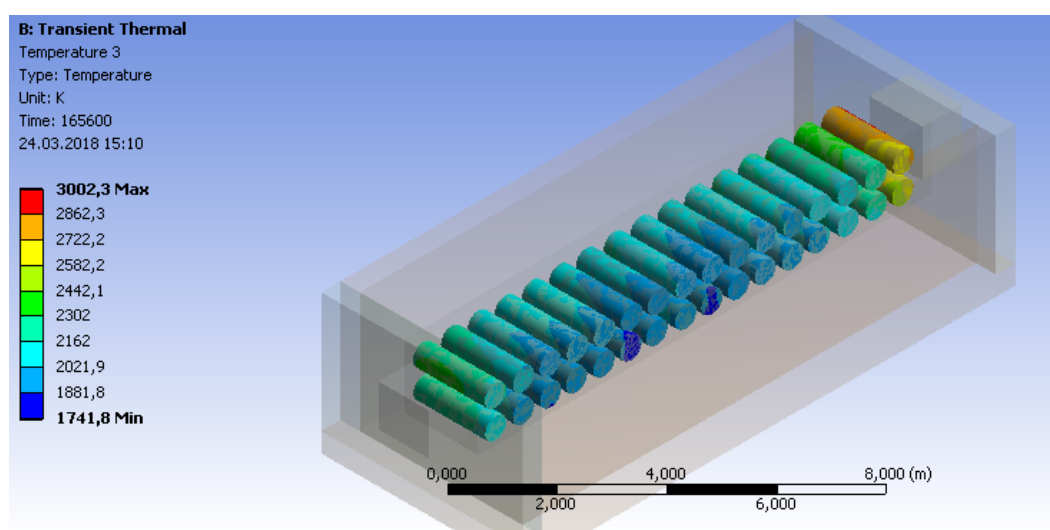


Рис. 3.1.4 – Температурні поля на розрізі печі по заготовкам (комбіноване завантаження)

Подальше моделювання продовжувалось до досягнення заготовками температури близько 3000 °С (рис. 3.1.1, 3.1.5 – 3.1.7). З цим пов'язаний різний час моделювання (22 год., 34 год., 60 год. та 41 год. при умові завантаження заготовками діаметром відповідно 400, 500 та 600 мм, а також при комбінованому завантаженні).

Рис. 3.1.5 – Температурні поля на розрізі печі по заготовкам (нагрівання 34 год.)
(діаметр виробів 500 мм.)Рис. 3.1.6 – Температурні поля на розрізі печі по заготовкам (нагрівання 60 год.)
(діаметр виробів 600 мм.)

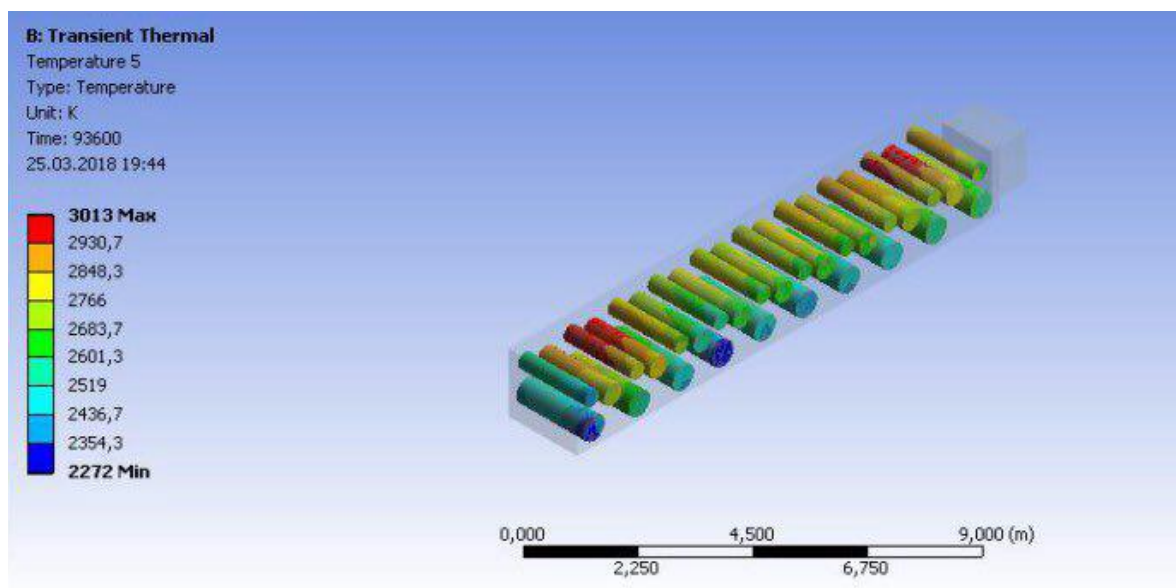


Рис. 3.1.7 – Температурні поля на розрізі печі по заготовкам (нагрівання 41 год.)
 (комбіноване завантаження)

Графік зміни максимальних температур заготовок, показаний на рис. 3.1.8.

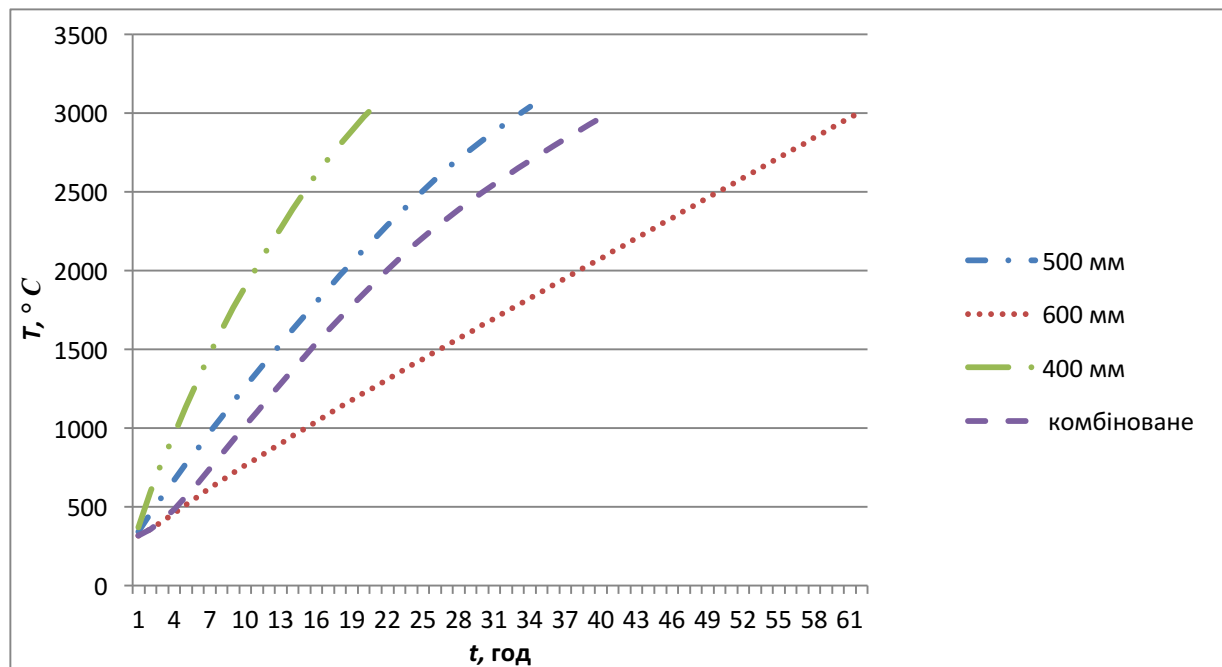


Рис. 3.1.8 – Графік зміни максимальної температури по заготовкам при нагріванні

Результати дослідження, представлені на рис. 3.1.1, 3.1.5 – 3.1.8, свідчать про те, що нагрівання заготовок при різних типах завантаження печі відбувається із суттєво різною інтенсивністю.

У той же час розташування заготовок з найменшою та найбільшою температурами фактично залишається незмінним. Змінюються лише абсолютні значення їх температур та час нагрівання до потрібної температури.

Заготовки з максимальною температурою знаходяться у торці печі з боку струмопідводу (1, 2) та на периферії верхнього ряду укладки (4). Це пов'язано з тим, що дані заготовки у найбільшій мірі контактують з пересипкою, а значить отримують більше тепла. Найменш нагрітими заготовками є розташовані у протилежному торці печі (5, 6) та на периферії нижнього ряду укладки (3) (рис. 3.1.9). Температурні режими саме цих характерних заготовок і будуть предметом подальших досліджень.

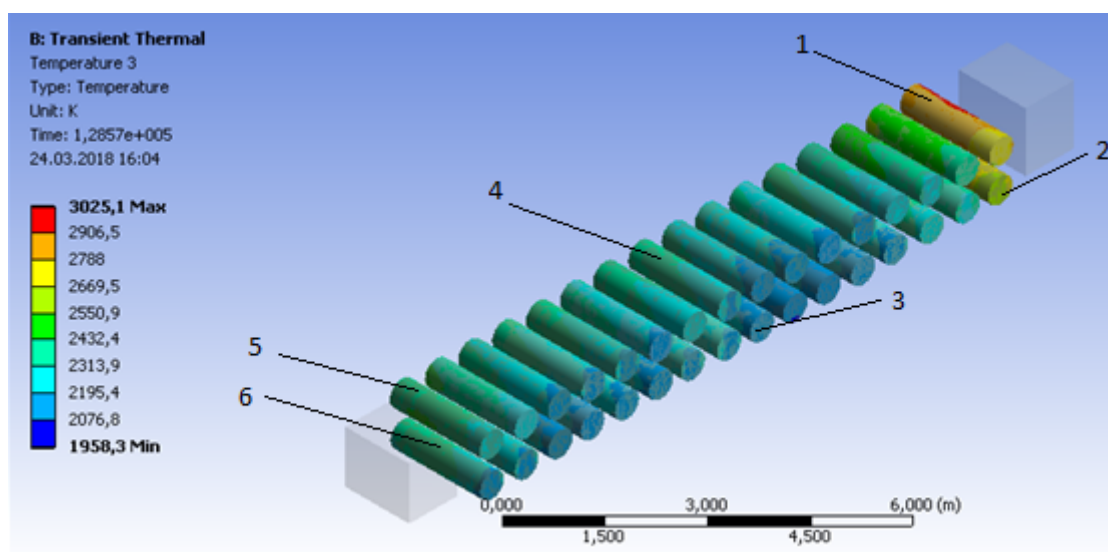


Рис. 3.1.9 – Розташування характерних заготовок

Графіки зміни максимальної та мінімальної температур для заготовок представлені на рис. 3.1.10 – 3.1.17.

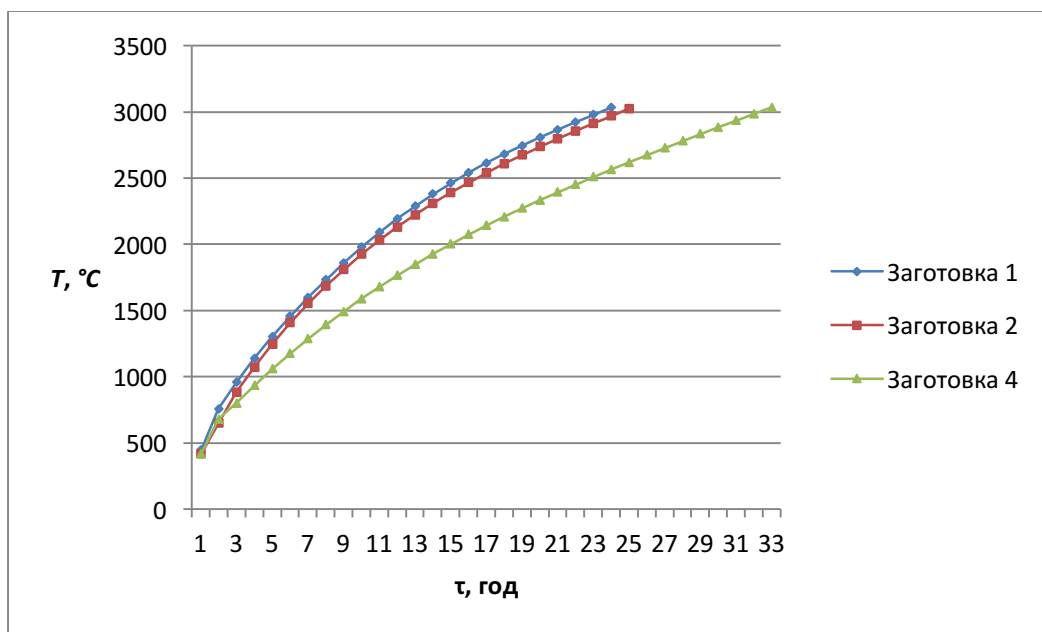


Рис. 3.1.10 – Графік зміни максимальної температури для заготовок діаметром 400 мм

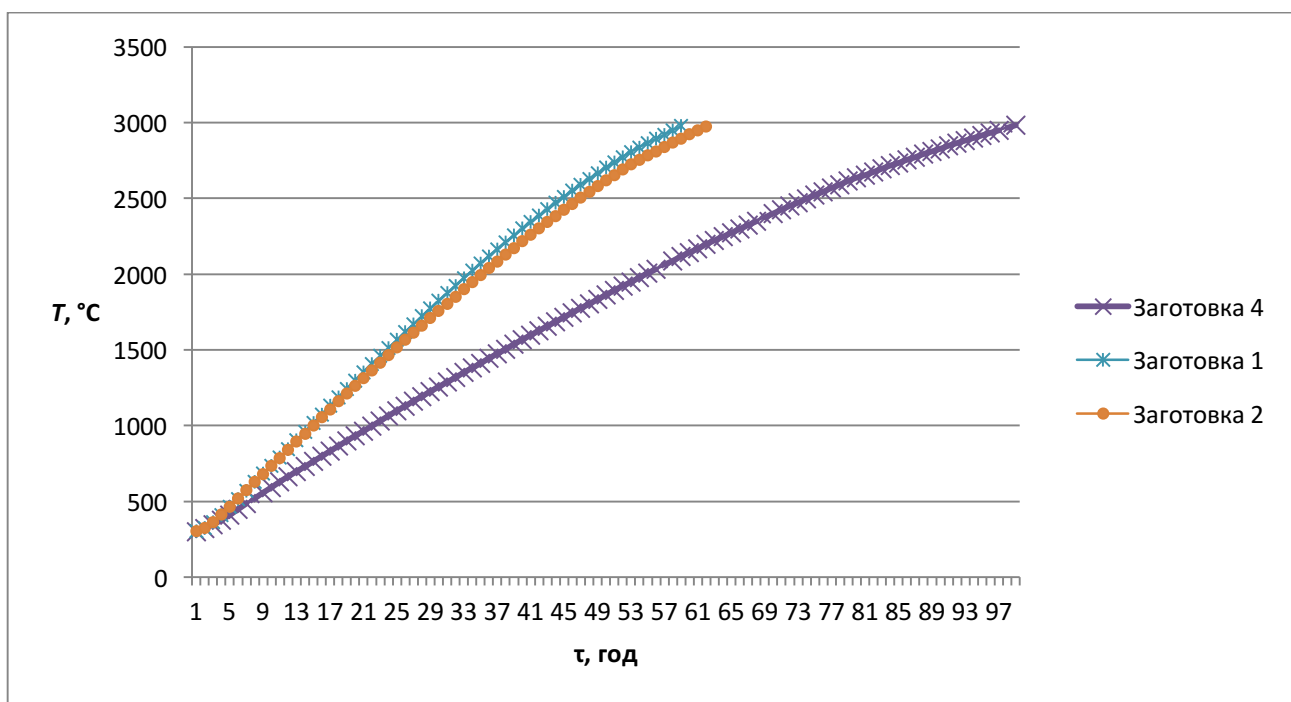


Рис. 3.1.11 – Графік зміни максимальної температури для заготовок діаметром 500 мм

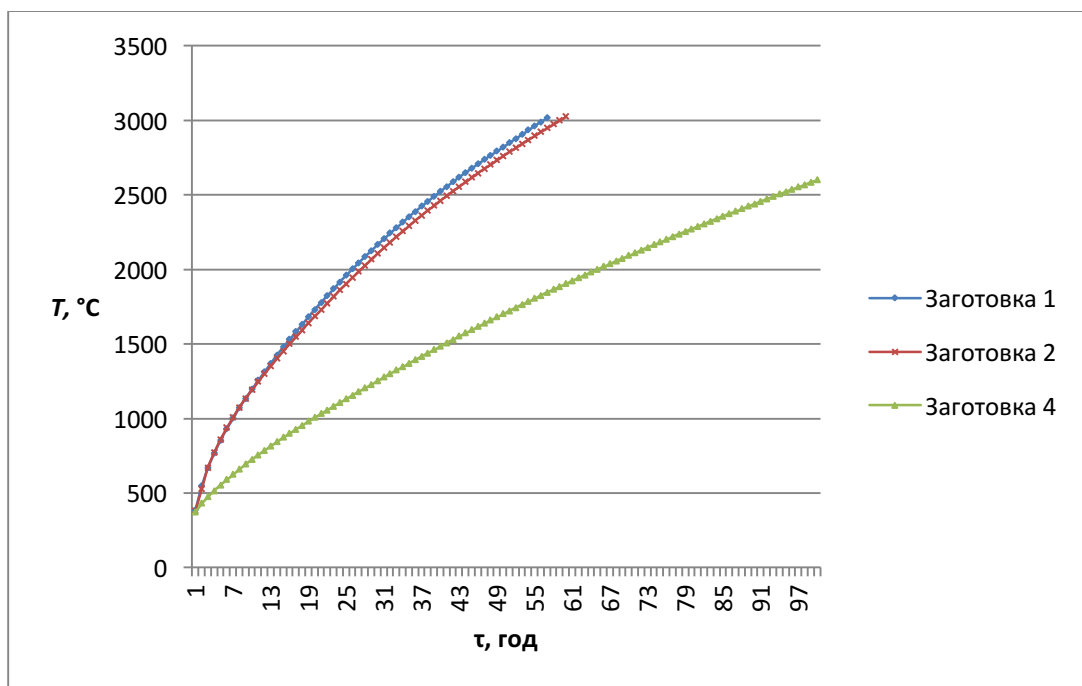


Рис. 3.1.12 – Графік зміни максимальної температури для заготовок діаметром 600 мм

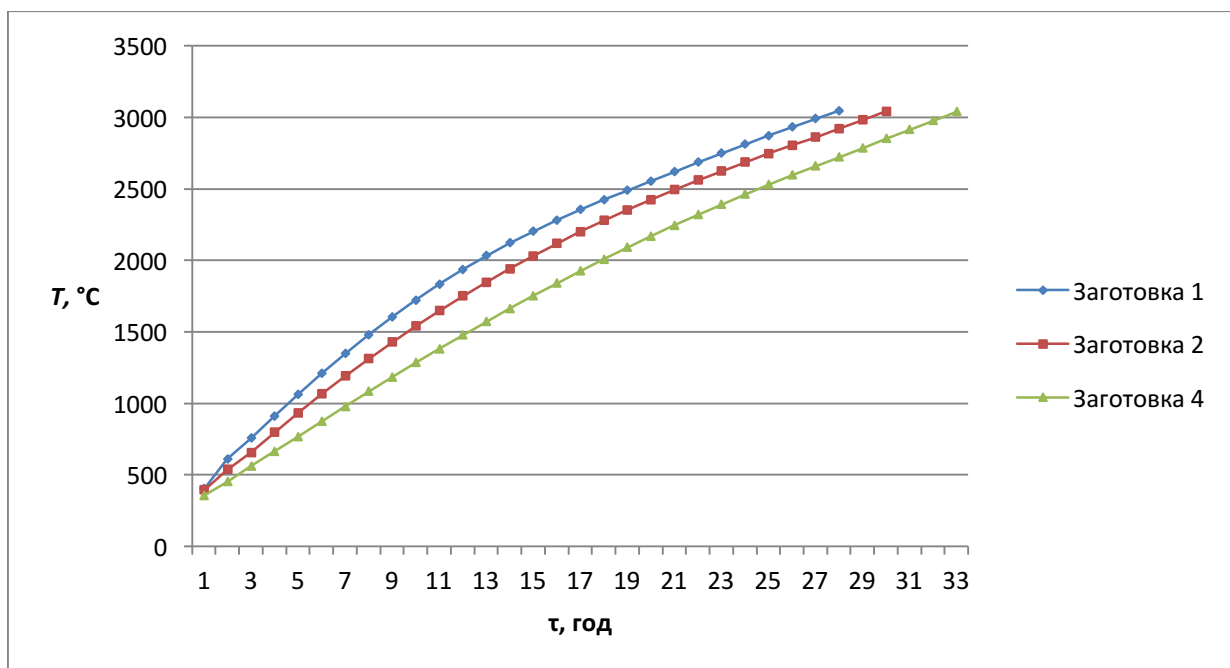


Рис. 3.1.13 – Графік зміни максимальної температури для заготовок комбінованого завантаження

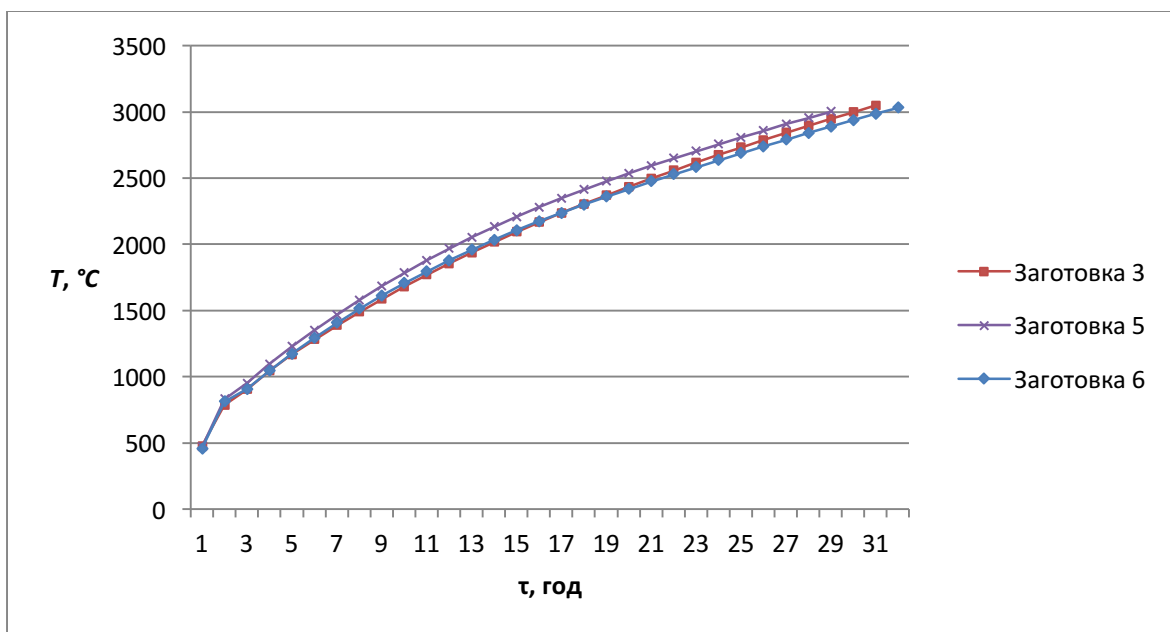


Рис. 3.1.14 – Графік зміни мінімальної температури для заготовок діаметром 400 мм

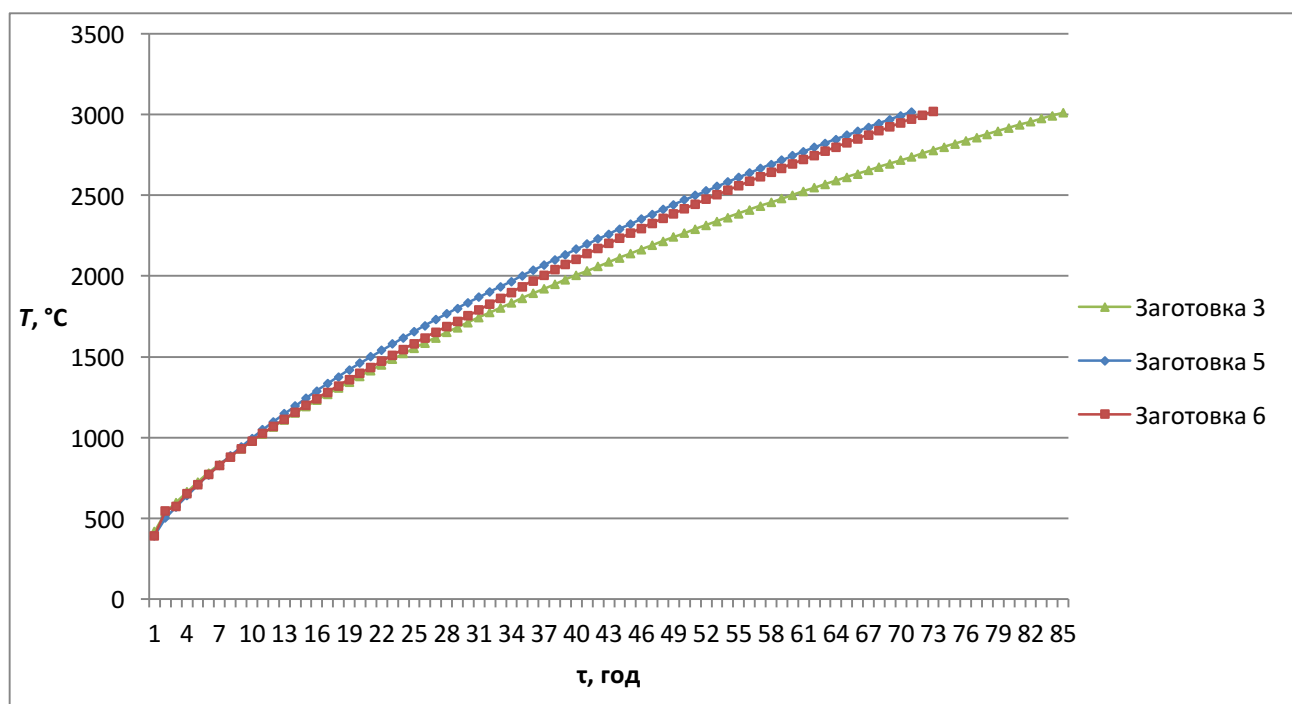


Рис. 3.1.15 – Графік зміни мінімальної температури для заготовок діаметром 500 мм

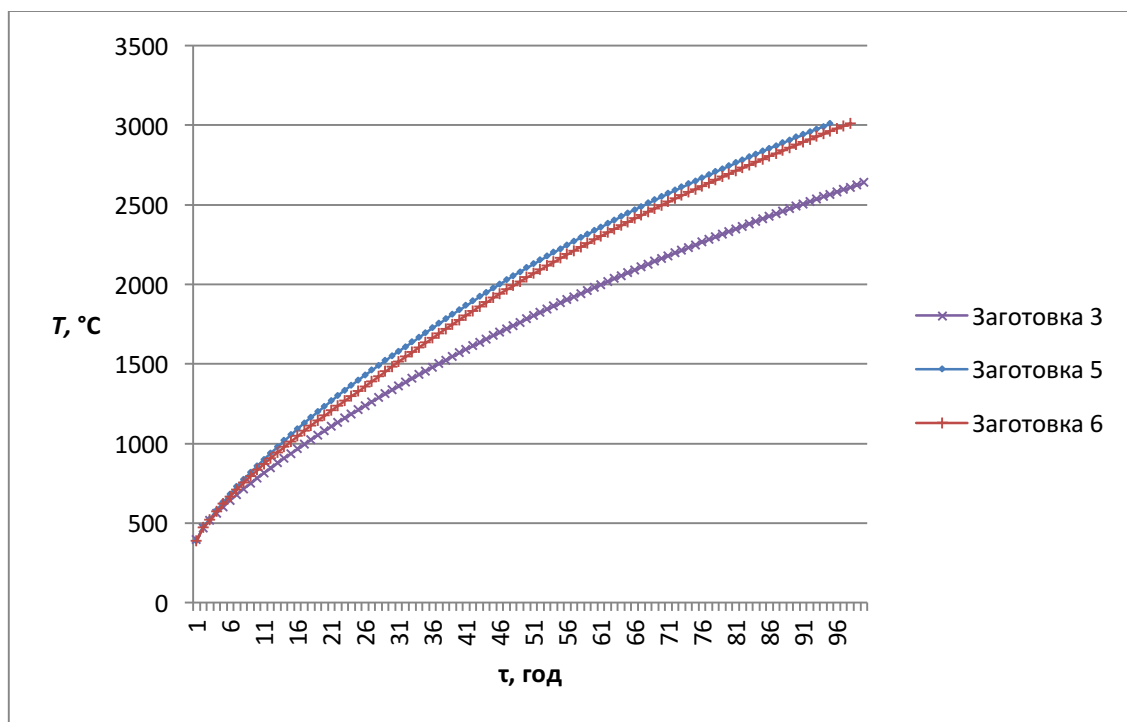


Рис. 3.1.16 – Графік зміни мінімальної температури для заготовок діаметром 600 мм

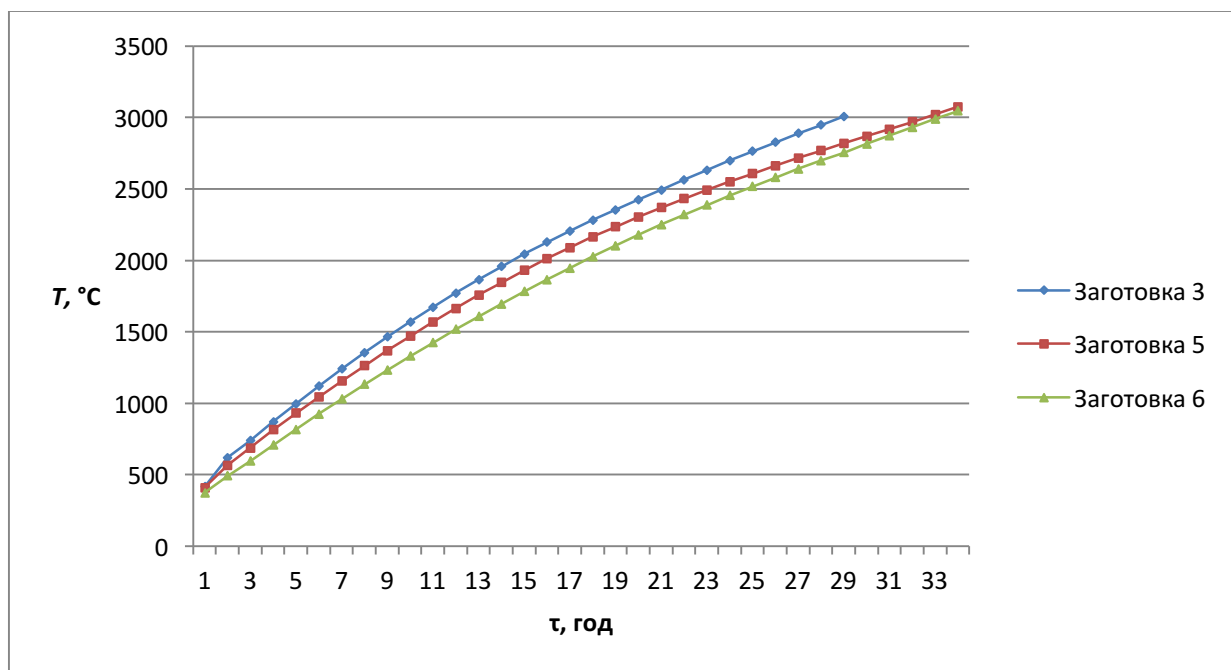


Рис. 3.1.17 – Графік зміни мінімальної температури для заготовок комбінованого завантаження

На рис. 3.1.18 – 3.1.21 показано яким чином змінюється перепад температур у характерних заготовках у процесі їх нагрівання. Найбільший перепад температур спостерігається у заготовках, що найшвидше нагріваються (1, 2).

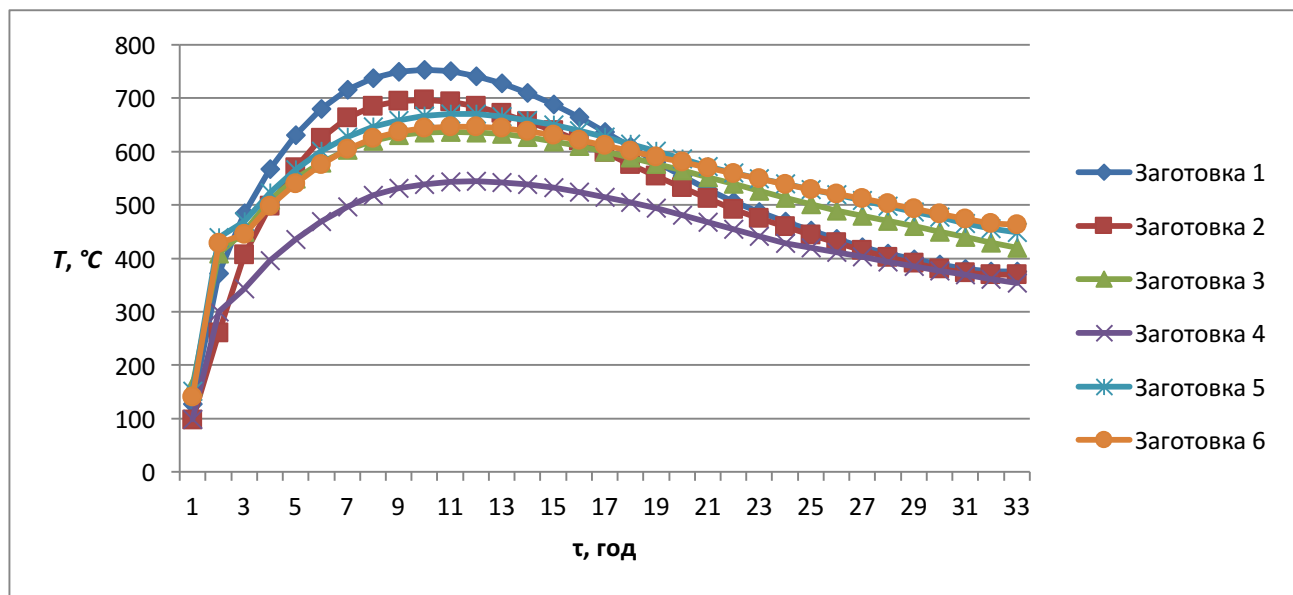


Рис. 3.1.18 – Графік перепаду температур при нагріванні у характерних заготовках (діаметром 400 мм)

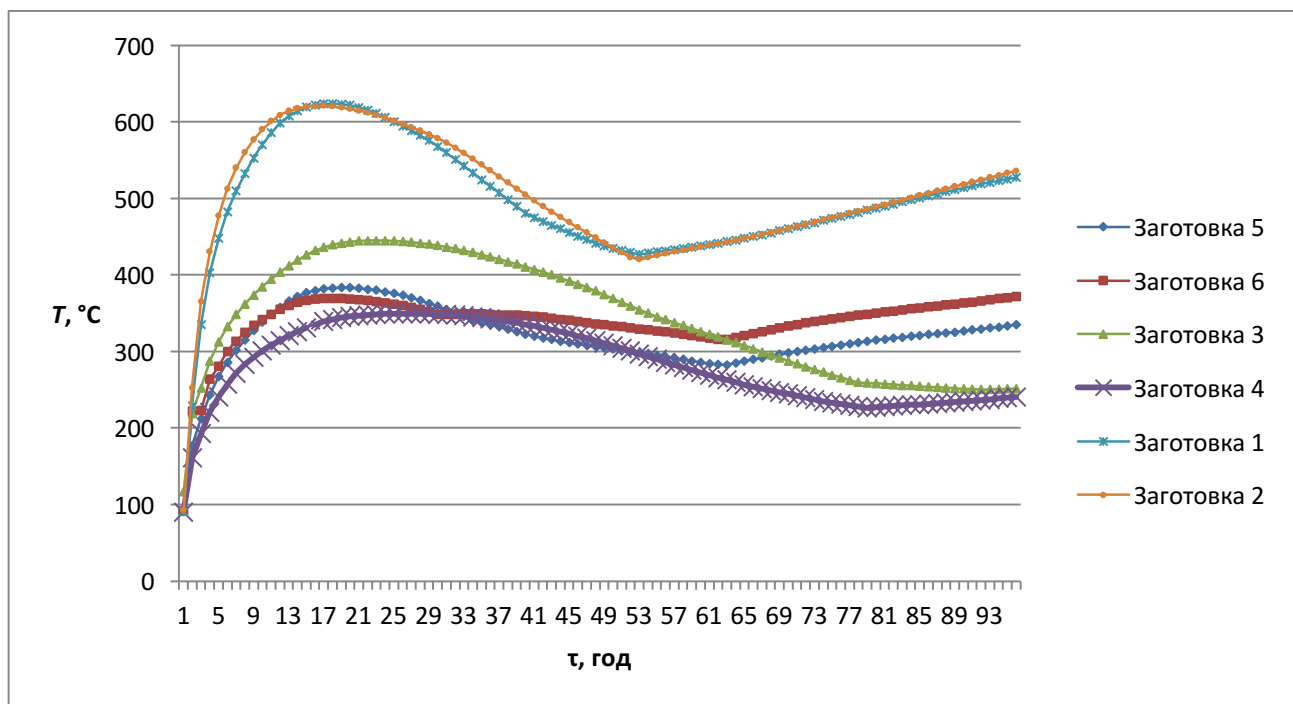


Рис. 3.1.19 – Графік перепаду температур при нагріванні у характерних заготовках (діаметром 500 мм)

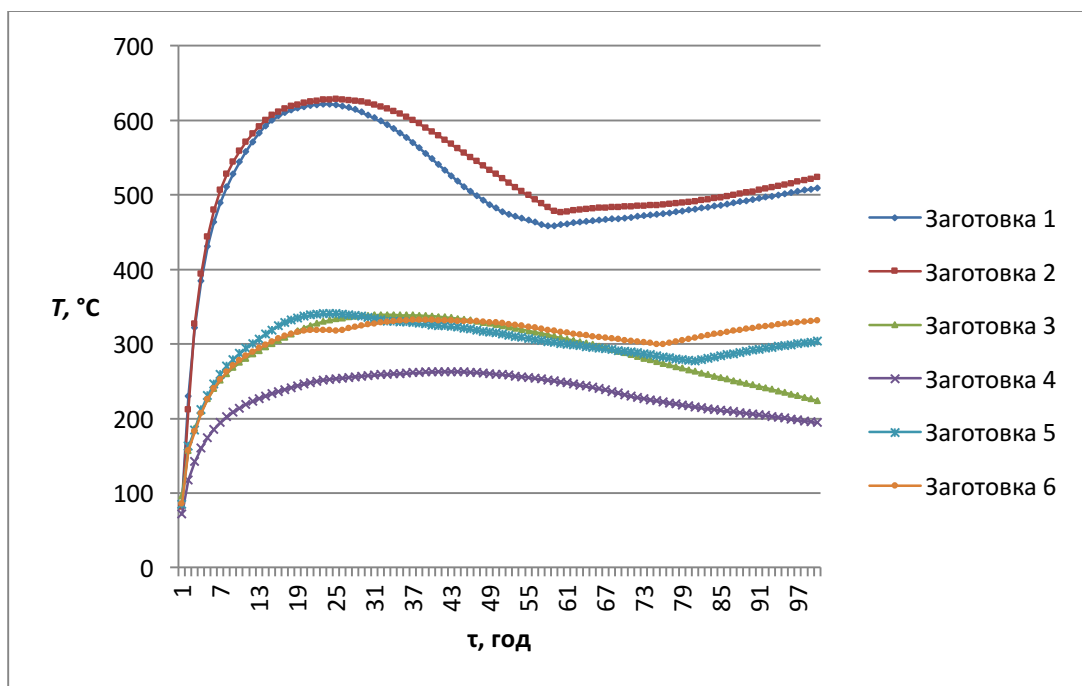


Рис. 3.1.20 – Графік перепаду температур при нагріванні у характерних заготовках (діаметром 600 мм)

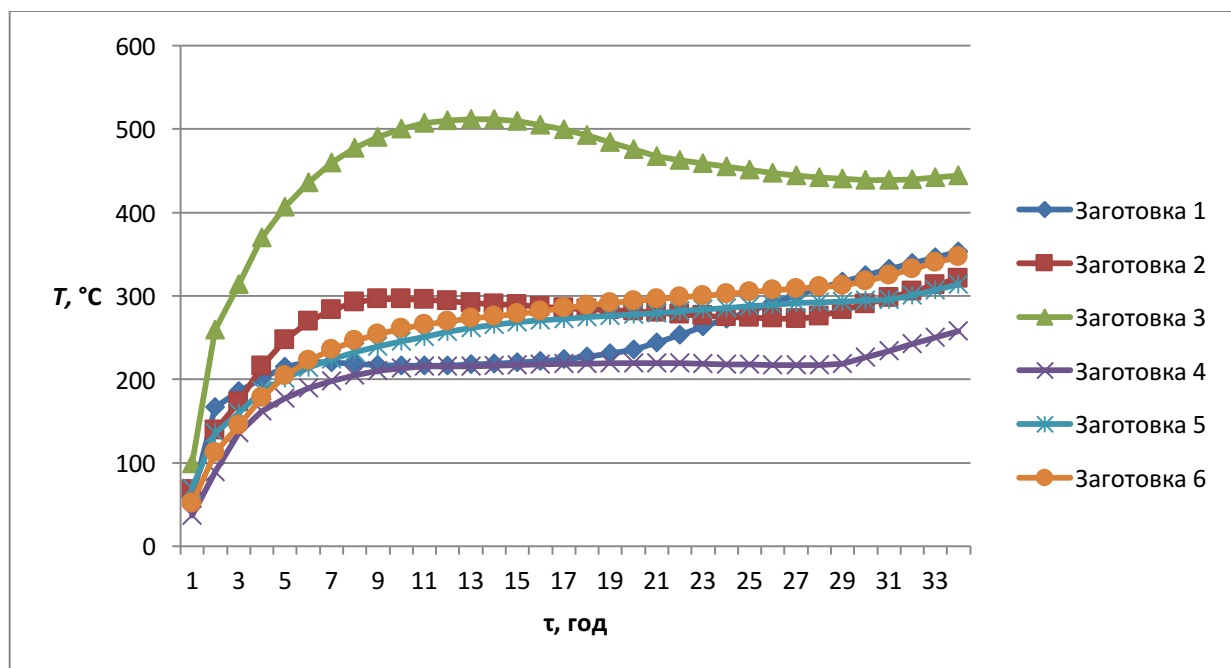


Рис. 3.1.21 – Графік перепаду температур при нагріванні у характерних заготовках (комбіноване завантаження)

Характерною особливістю процесу нагрівання є те, що найбільший перепад температур в усіх заготовках спостерігається фактично в один і той самий час (приблизно 27 год.), але цей час різний для різних діаметрів.

3.2. Режим охолодження

Результати моделювання температурних полів вуглецевих заготовок після 20-ти годин охолодження представлені на рис. 3.2.1 – 3.2.4. Як випливає з представлених результатів найшвидше остигають заготовки на торцях печі (1, 2, 5, 6) та на периферії верхнього ряду укладки (3). Що стосується останньої обставини, то це пояснюється знову ж таки більшою контактною поверхнею цих заготовок з пересипкою, що сприяє швидшому охолодженню, заготовки на торцях у найбільшій мірі наближені до зовнішнього (холодного) середовища.

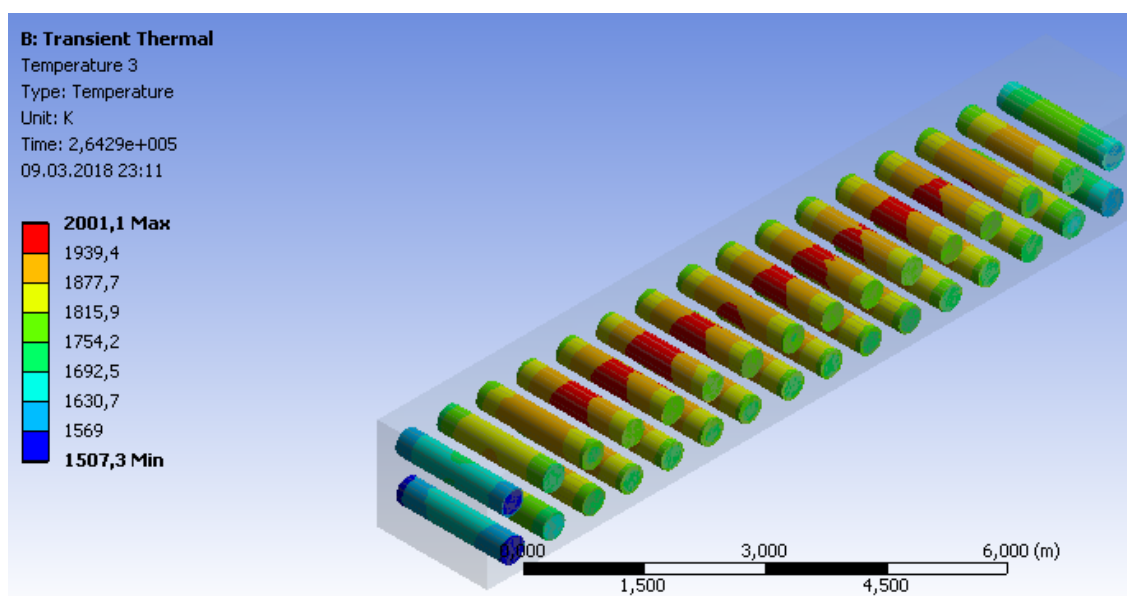


Рис. 3.2.1 – Температурні поля на розрізі печі по заготовкам

(діаметр виробів 400 мм.)

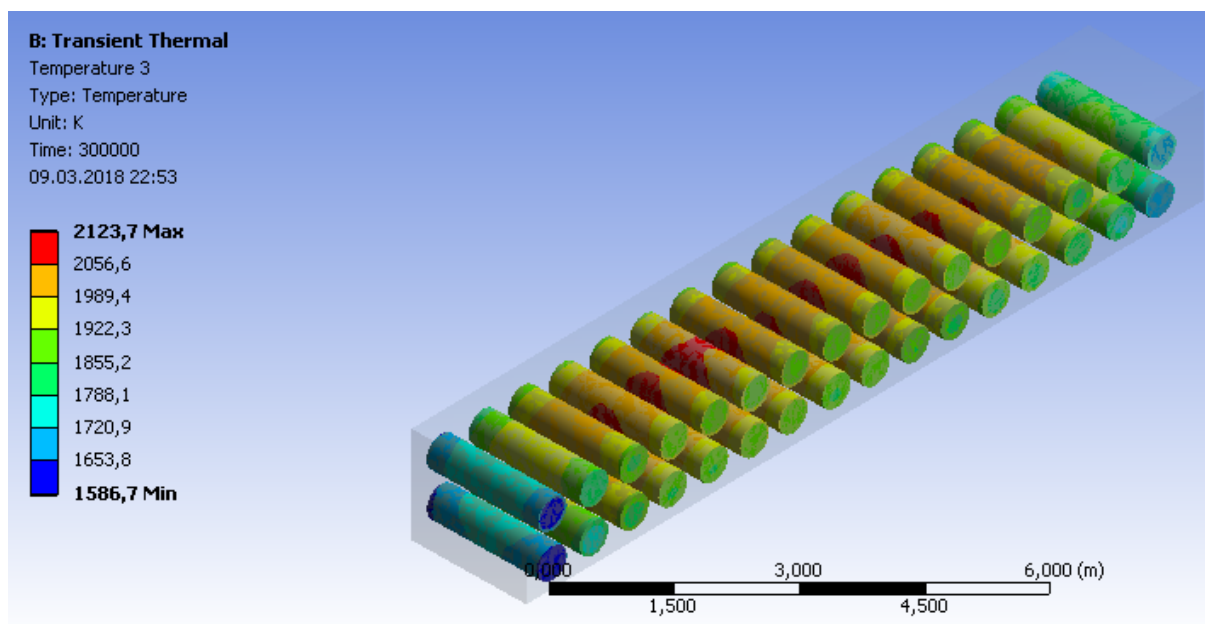


Рис. 3.2.2 – Температурні поля на розрізі печі по заготовкам
 (діаметр виробів 500 мм.)

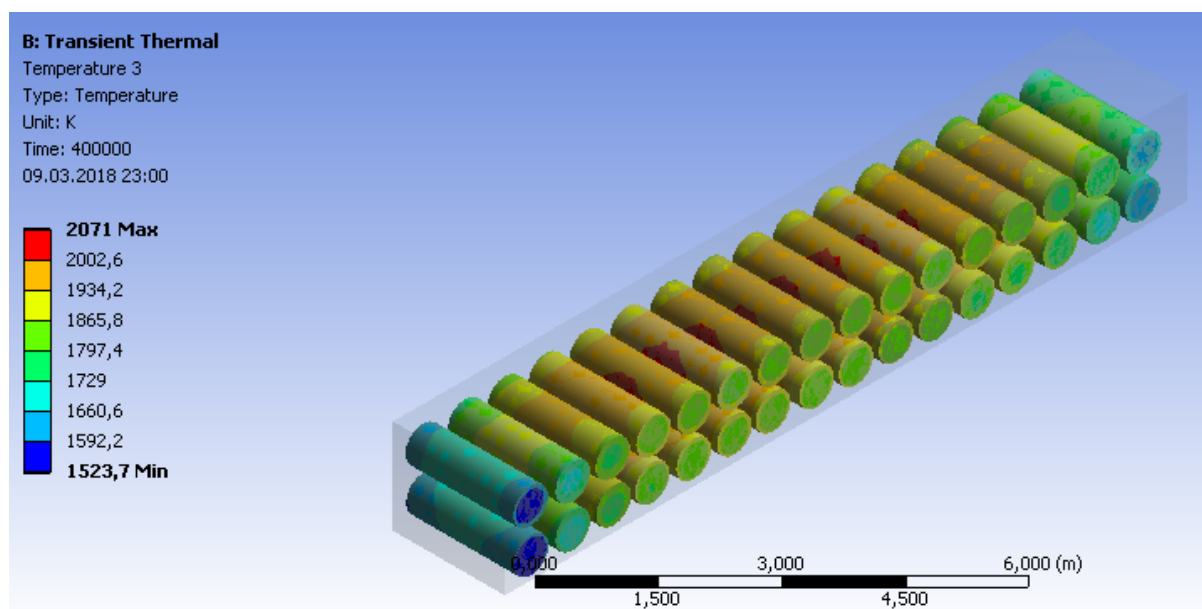


Рис. 3.2.3 – Температурні поля на розрізі печі по заготовкам
 (діаметр виробів 600 мм.)

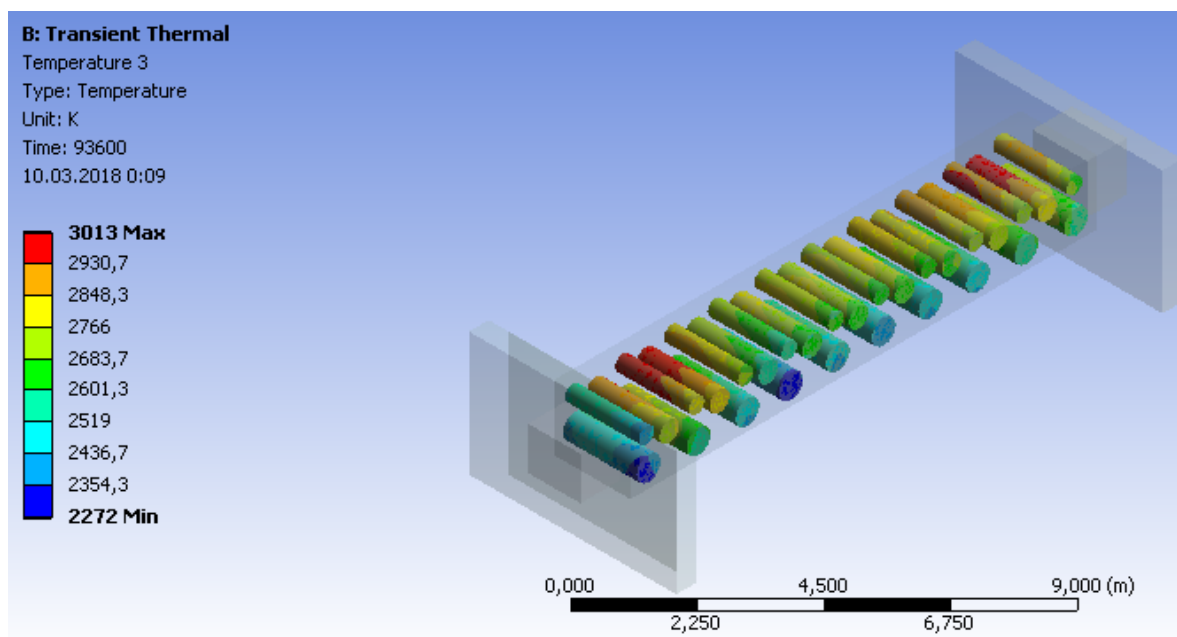


Рис. 3.2.4 – Температурні поля на розрізі печі по заготовкам (комбіноване завантаження)

Графік зміни температури у часі у характерних заготовках показаний на рис.

3.2.5.

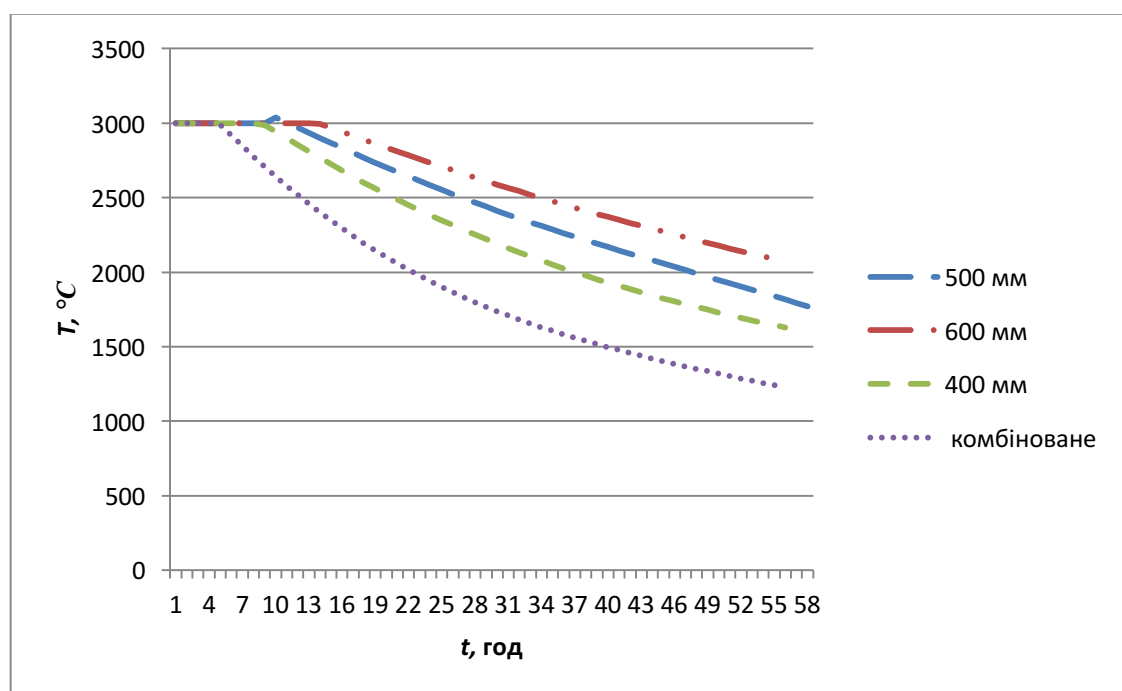


Рис. 3.2.5 – Графік зміни температури у часі у характерних заготовках

Графіки зміни температури у часі у характерних заготовках, що охолоджуються найшвидше та найповільніше, показані на рис. 3.2.6 – 3.2.9 та 3.2.10 – 3.2.13.

На рис. 3.2.14 – 3.2.17 показано яким чином змінюється перепад температур у характерних заготовках у процесі їх охолодження. Найбільший перепад температур спостерігається у заготовках, що найшвидше охолоджуються (1, 2, 5, 6).

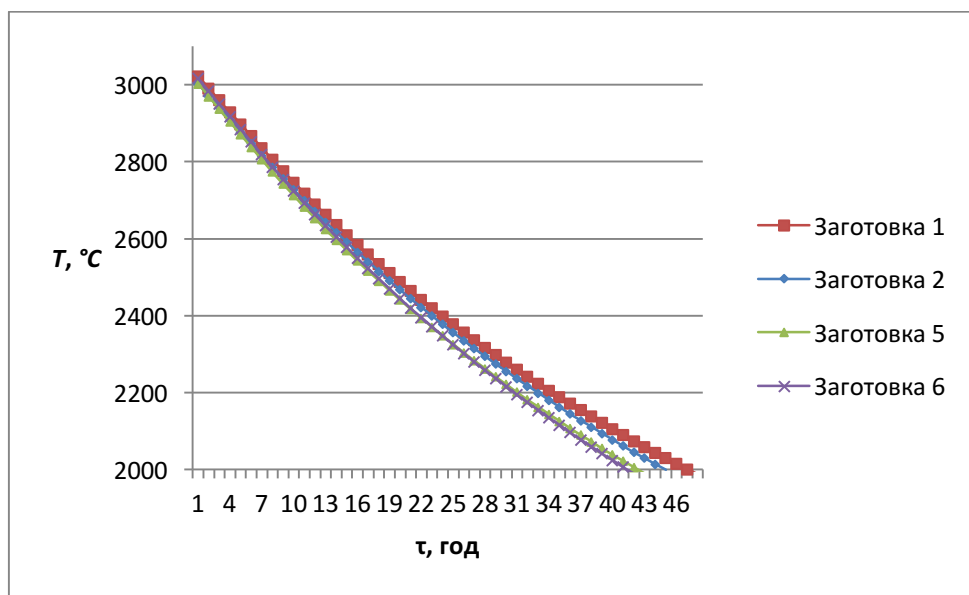


Рис. 3.2.6 – Графік зміни температури у часі у характерних заготовках діаметром 400мм, що найшвидше охолоджуються

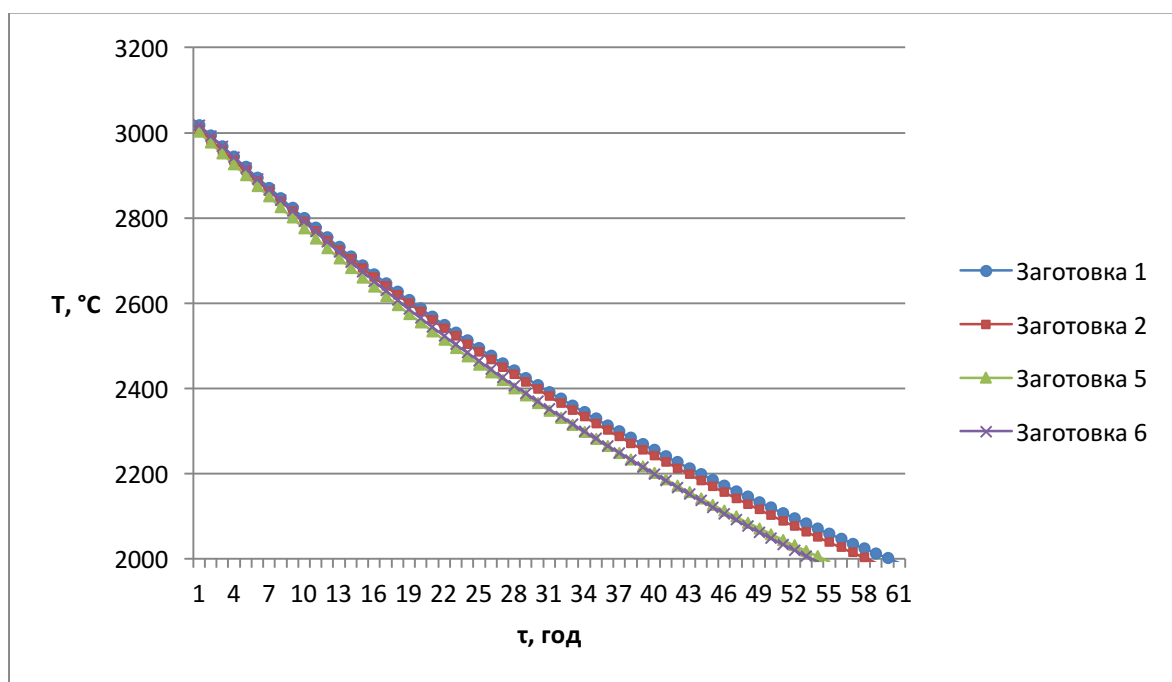


Рис. 3.2.7 – Графік зміни температури у часі у характерних заготовках діаметром 500мм, що найшвидше охолоджуються

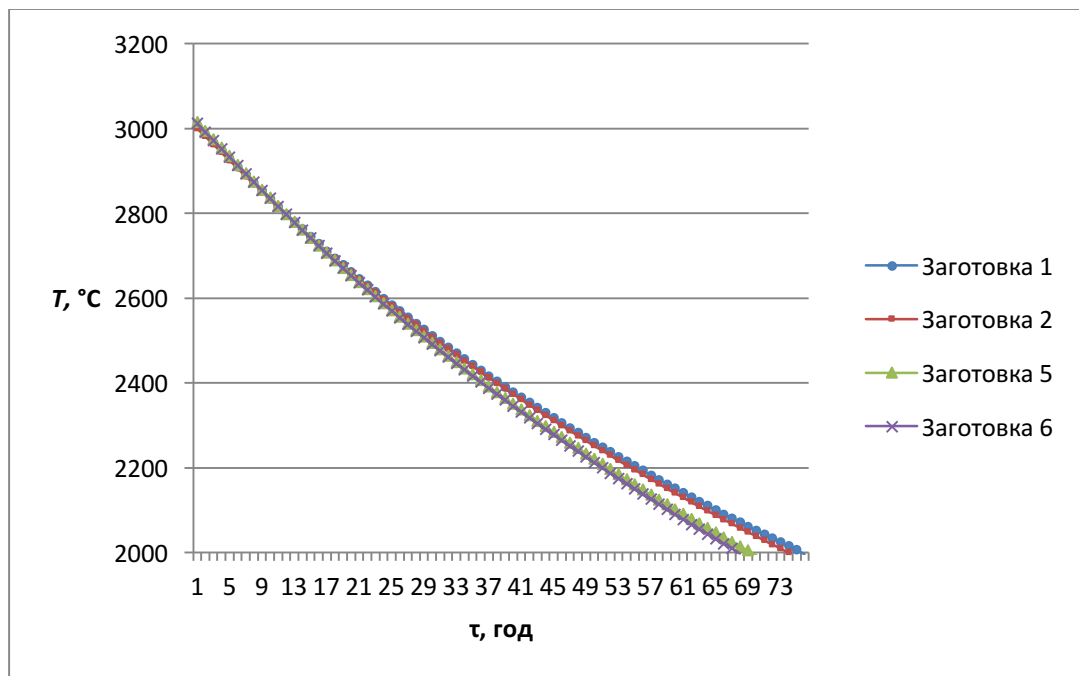


Рис. 3.2.8 – Графік зміни температури у часі у характерних заготовках діаметром 600мм, що найшвидше охолоджуються

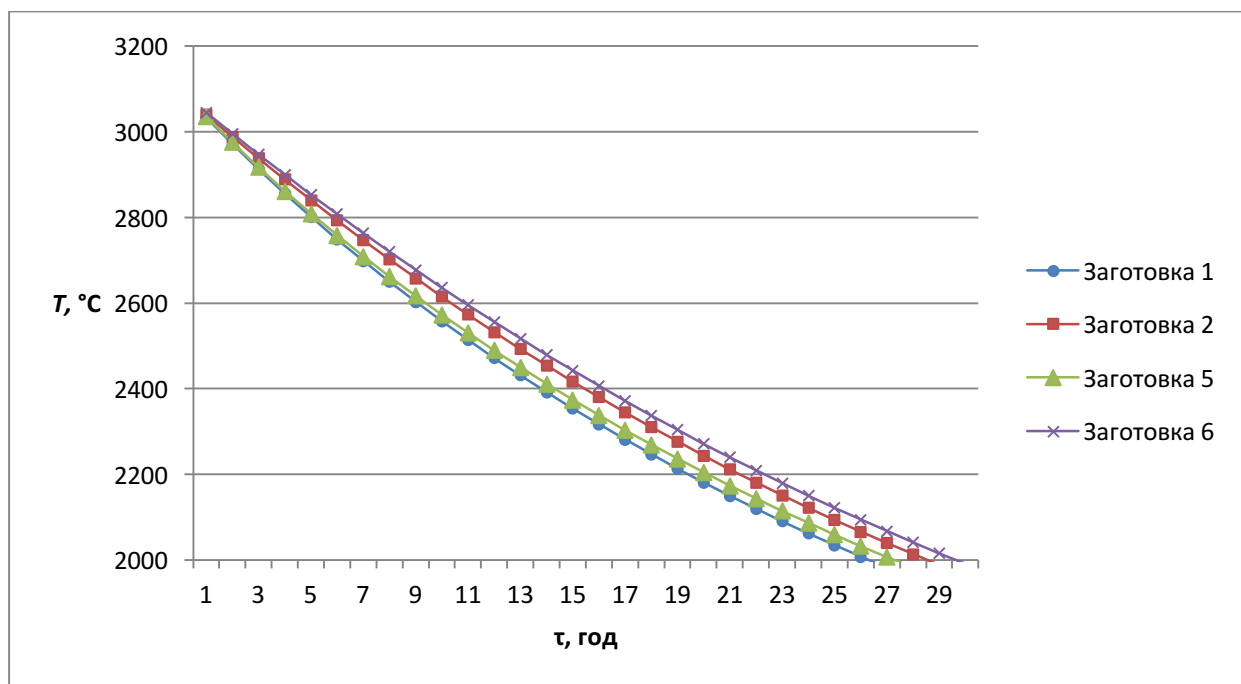


Рис. 3.2.9 – Графік зміни температури у часі у характерних заготовках при комбінованому завантаженні, що найшвидше охолоджуються

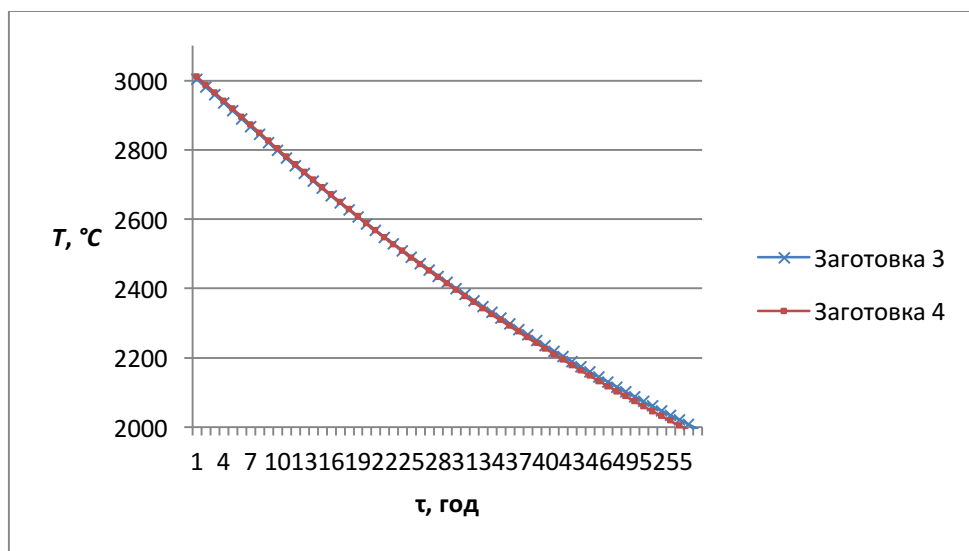


Рис. 3.2.10 – Графік зміни температури у часі у характерних заготовках діаметром 400мм, що охолоджуються найповільніше

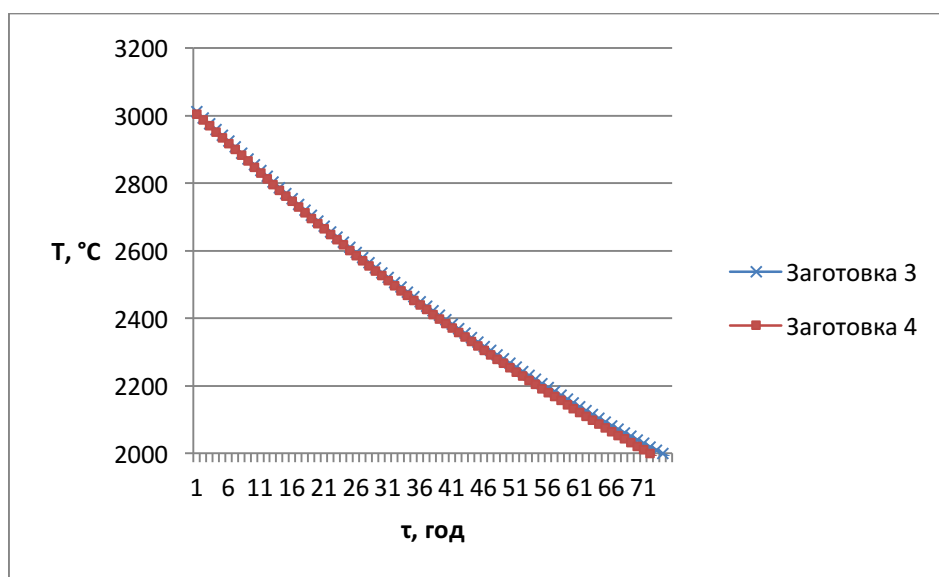


Рис. 3.2.11 – Графік зміни температури у часі у характерних заготовках діаметром 500мм, що охолоджуються найповільніше

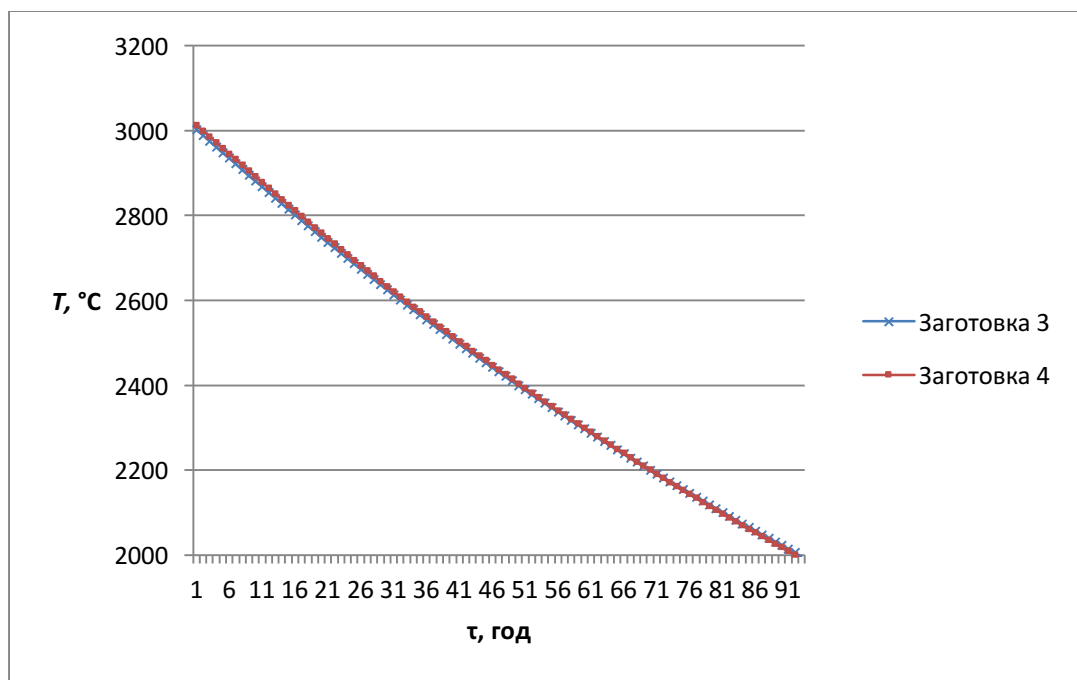


Рис. 3.2.12 – Графік зміни температури у часі у характерних заготовках діаметром 600мм, що охолоджуються найповільніше

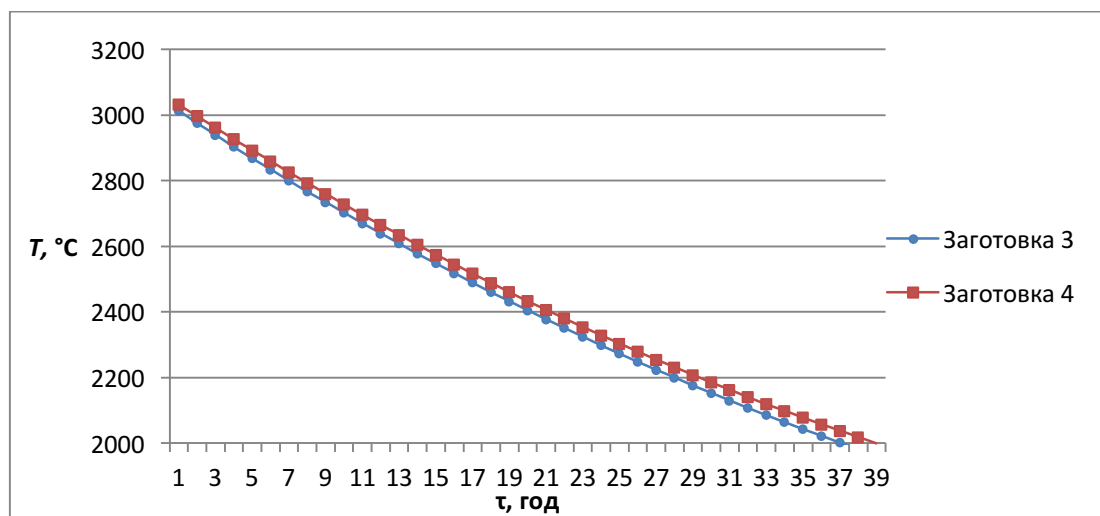


Рис. 3.2.13 – Графік зміни температури у часі у характерних заготовках при комбінованому навантаженні, що охолоджуються найповільніше

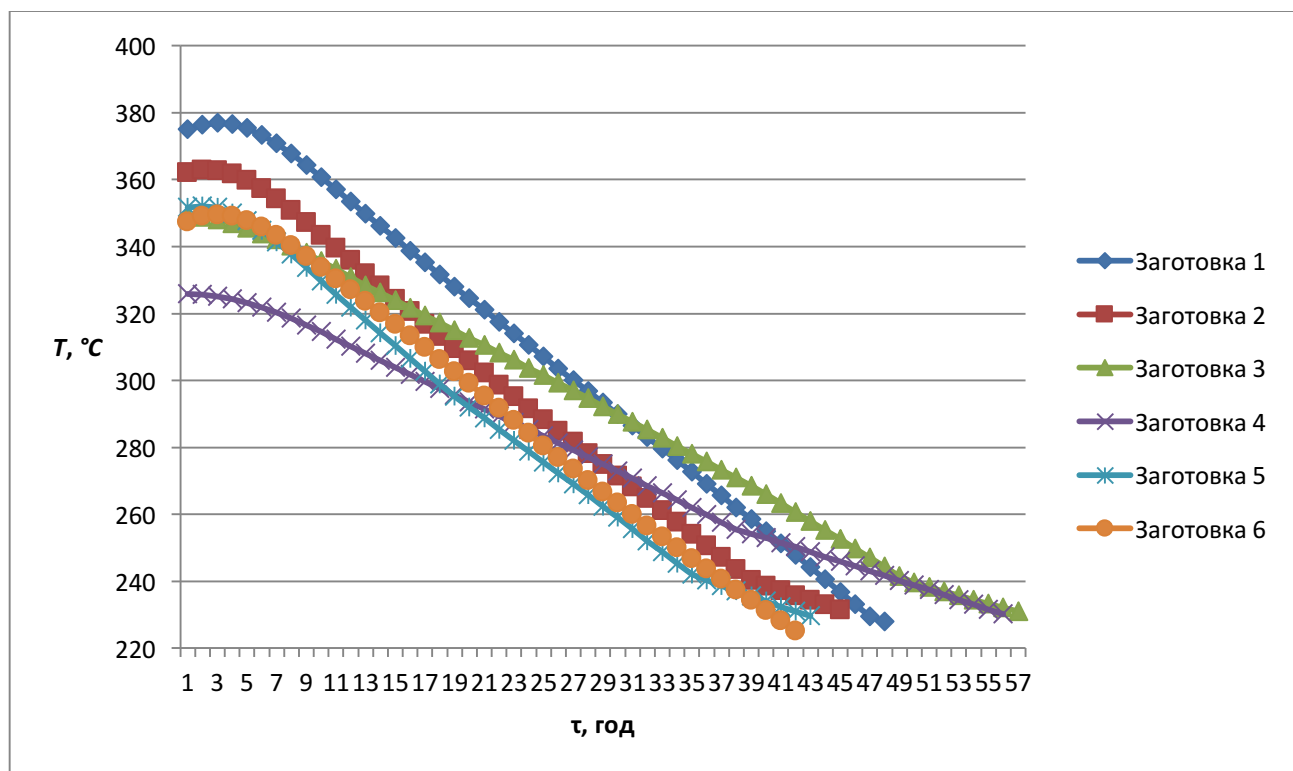


Рис. 3.2.14 – Графік перепаду температур при нагріванні у характерних заготовках
(діаметром 400 мм)

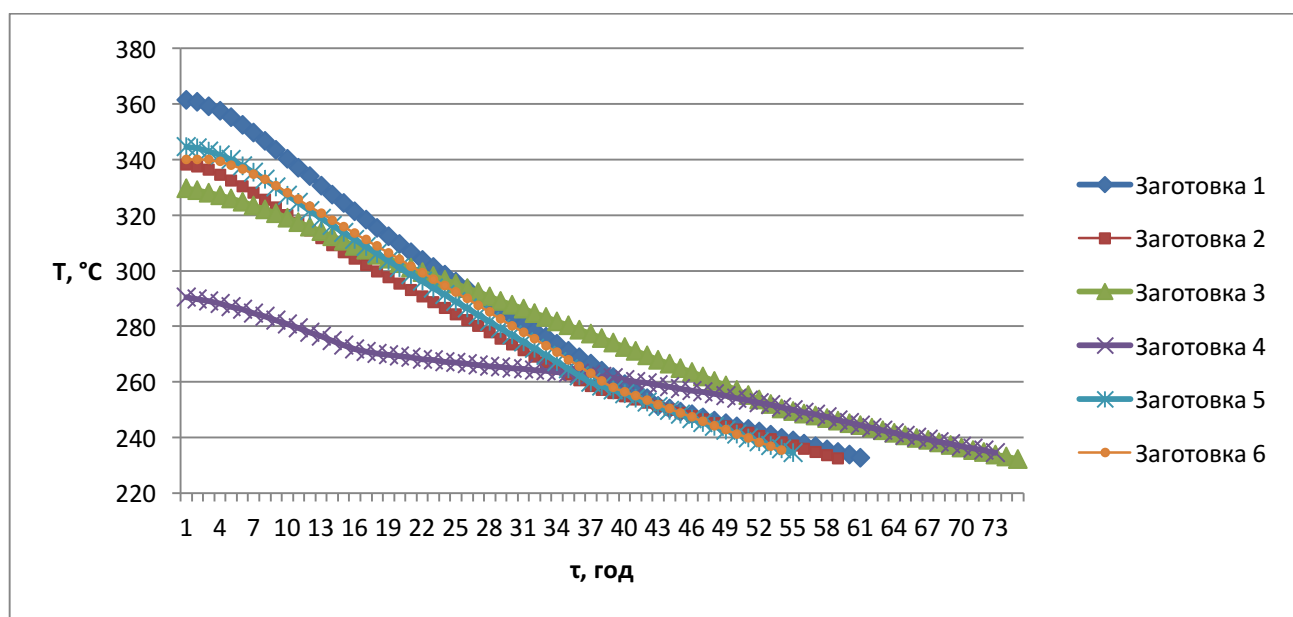


Рис. 3.2.15 – Графік перепаду температур при нагріванні у характерних заготовках
(діаметром 500 мм)

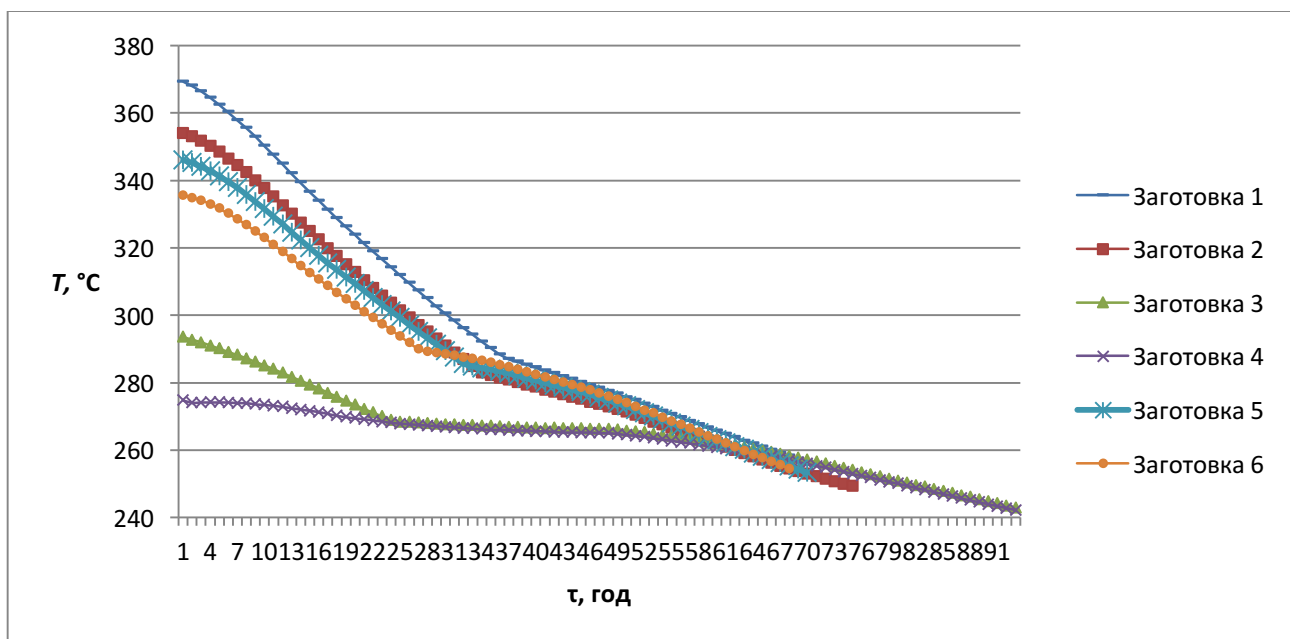


Рис. 3.2.16 – Графік перепаду температур при нагріванні у характерних заготовках (діаметром 600 мм)

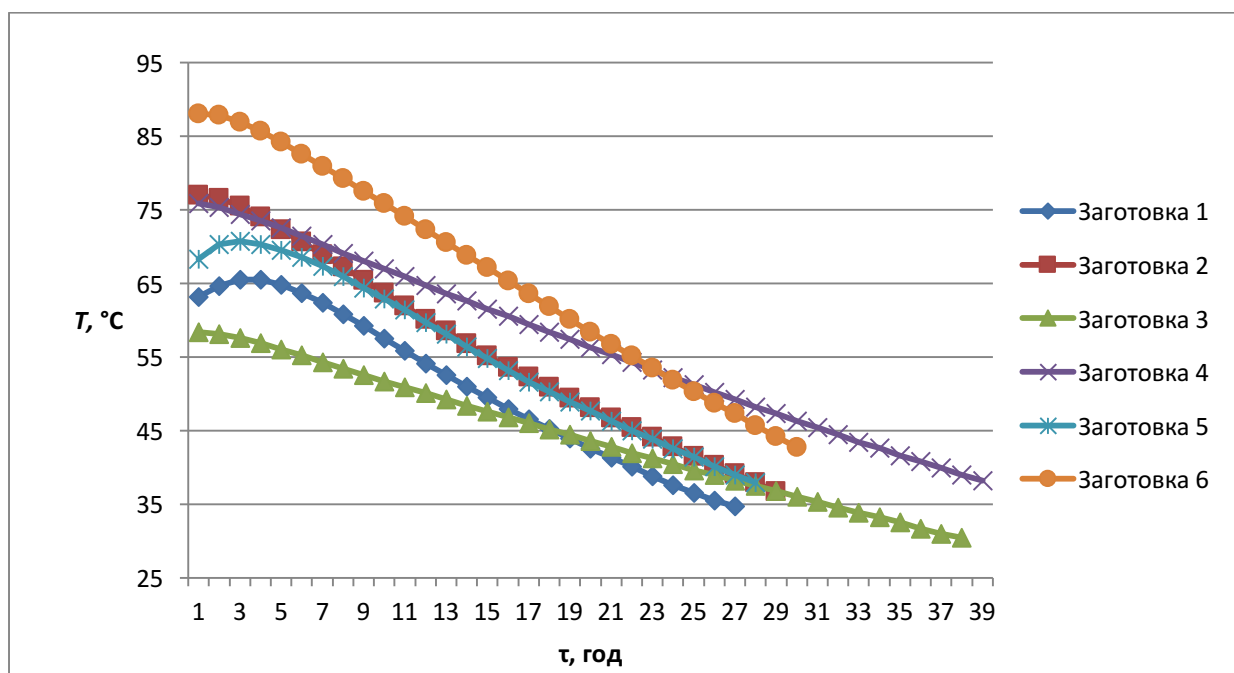


Рис. 3.2.17 – Графік перепаду температур при нагріванні у характерних заготовках (комбіноване завантаження)

Результати проведеного дослідження свідчать про те, що температурні поля процесу графітування вуглецевих виробів як у режимі нагрівання, так і у режимі охолодження суттєво залежать від типу заготовок, що завантажуються у піч, а також від їх розташування. Ця обставина не дозволяє сформулювати єдину програму ведення

технологічного процесу і ставить задачу адаптації технологічного регламенту до виробничої ситуації, що утворилася. Особливої складності ця задача набуває тоді, коли мають місце непередбачувані відключення печі графітування від енергопостачання.

Враховуючи суттєву температурну розподіленість процесу графітування, визначені місця розташування заготовок з найбільшою та найменшою температурою як у режимі нагрівання, так і у режимі охолодження. Це дозволяє з більшою точністю визначити потрібну тривалість процесу графітування до досягнення виробами заданого ступеня графітування.

Як показали результати проведеного дослідження, місця розташування характерних заготовок практично не змінюються у залежності від типу завантаження печі.

Для запобігання порушення механічної міцності вуглецевих виробів у процесі графітування потрібно забезпечити такі режими роботи, які не призводять до перевищення певного перепаду температур у заготовках. Проведене дослідження дозволило виявити місця розташування заготовок з найбільшими перепадами температур та динаміку останніх у процесі графітування.

4. Побудова спрощеної математичної моделі процесу графітування вуглецевих виробів та її дослідження

4.1. Обґрунтування необхідності спрощення математичної моделі

Математична модель, описана в п.2.2 дає змогу враховувати такі основні фактори, що визначають формування поля температур в керні, як масоперенос вологи і залежність від тиску і температури електропровідності пересипки печі. Також математична постановка вищезгаданої моделі дає можливість розраховувати напружено-деформовані стани (НДС), що огорожують конструкції печі, і, таким чином, оцінювати довговічність роботи конструкції, наприклад, крихких графітових струмопідводів печі, як найбільш слабого, в сенсі експлуатаційної надійності частини обладнання.

Основним критерієм оцінки достовірності отриманих результатів за допомогою математичної моделі є їх верифікація на даних натурних експериментів, що отримуються в промислових умовах на діючому пічному обладнанні.

Для чисельного рішення сформульованої задачі у п.2.2 використовується метод скінченних елементів (МСЕ), що отримав найбільше застосування для рішення широкого класу наукових та інженерних задач.

З аналізу системи рівнянь (2.2.13) видно, що перше рівняння є нестационарним, а два інших квазістационарними. Таким чином, на розподіл поля температур в поточний момент часу здійснює вплив його розподіл в попередні моменти часу, в той час, як розподіл полів електричного потенціалу і механічних напруг формується миттєво, тобто не залежить від розподілу цих полів в попередні моменти часу. Основним джерелом нагріву печі Ачесона є джоулева теплота, що виділяється за рахунок проходження електричного струму через керн. Другим, за значимістю джерелом теплоти, є теплота хімічних реакцій конверсії водяної пари в керновій пересипці і окису вуглецю і водню в теплоізоляції.

У відповідності з (2.2.13) значення джоулевої теплоти, що виділяється в керні, залежить від квадрату напруженості електричного поля ($E = -\nabla U$, В/м) і електропровідності матеріалів, яка в свою чергу залежить від температури і тиску. З експериментальних даних по двопараметричній залежності електропровідності $\chi(T, p)$ пересипочних вуглецевих матеріалів випливає, що в межах зміни робочої температури та тиску в сипких вуглецевих матеріалах печі Ачесона залежність електропровідності від зміни температури набагато більша, ніж від тиску.

Сучасні комп'ютерні системи керування, як правило, будуються на основі математичних моделей керованих процесів. Тому при створенні системи керування піччю – основним технологічним апаратом у виробництві графітової продукції – потрібна математична модель даного об'єкту керування. Така модель описана у п.2.1 математична модель фізичних полів процесу графітування даної роботи. Враховуючи, що піч Ачесона є об'єктом керування з розподіленими параметрами, запропонована математична модель являє собою систему диференціальних рівнянь у частинних похідних достатньо складного виду. Типовим наслідком моделювання таких систем є трансцендентний характер залежності відповідних передатних функцій від комплексної змінної, що суттєво ускладнює їх аналіз та використання при синтезі систем керування та фактично обмежує їх практичне застосування у комп'ютерних системах керування, оскільки вище представлена математична модель для розрахунку потребує досить тривалого часу, що є неприпустимим у процесі керування процесом графітування та викликає досить великі проблеми зі швидкою характеристикою процесу.

Названі вище обставини викликають потребу у розробленні спрощеної математичної моделі печі графітування, яка б описувала її поведінку з потрібною точністю.

4.2. Аналіз методів спрощення математичних моделей

У наш час розроблений цілий ряд методів побудови спрощених математичних моделей систем з розподіленими параметрами (СРП) [52, 53, 54]. Всі вони можуть бути умовно поділені на дві основні групи згідно «предмету апроксимації» [55].

Перша група утворюється різними способами спрощеного представлення самих вихідних диференціальних рівнянь об'єкта, наступний розв'язок яких відомими методами дозволяє отримати задовільні за точністю у визначених конкретних умовах опису властивостей СРП у порівняно простому вигляді.

Методи другої групи базуються на наближеному представленні (як правило, у типовій для систем з зосередженими параметрами (СЗП) формі відповідних передатних функцій) точних розв'язків рівнянь у частинних похідних, які моделюють поведінку СРП.

Можливе послідовне застосування до однієї й тієї самої СРП різних методів апроксимації, що дозволяють, наприклад, спочатку перейти до спрощеного, що допускає точний аналітичний розв'язок, рівнянню об'єкта, для якого потім знайти дробово-раціональне наближення його передатної функції, що визначає результуюче наближення опису вихідної моделі об'єкта у вигляді типових моделей СЗП.

Одним з найбільш ефективних методів побудови спрощеної математичної моделі СРП є метод розділення змінних (метод Фур'є) [55, 56], що передбачає представлення функції декількох змінних (часу і просторових координат) у формі нескінченного ряду, кожний член якого являє собою добуток двох функцій однієї змінної – часу та просторової координати

$$T(\xi, t) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i(t) \varphi_i(\xi), \quad (4.2.1)$$

де апіорі невідомі функції $a_i(t)$ та $\varphi_i(\xi)$ мають бути вибрані таким чином, щоб керована змінна $T(\xi, t)$ задовольняла граничним умовам задачі.

На практиці ряд (4.2.1) обмежують n членами:

$$\hat{T}(\xi, t) = \sum_{i=1}^n a_i(t) \varphi_i(\xi)$$

і тоді задача апроксимації зводиться до визначення невідомих функцій $a_i(t)$ та $\varphi_i(\xi)$ із умови мінімізації певного функціонала похибки апроксимації та дослідженню збіжності $\hat{T}(\xi, t)$ до $T(\xi, t)$ при $n \rightarrow \infty$.

Дана задача розглядалася у працях багатьох авторів [55, 56]. Однак існуючі методи не повністю задовольняють дослідників з різних причин: у зв'язку з обчислювальними труднощами як такими, не завжди виконуються умови збіжності обчислювальних процедур, складно оцінити похибку апроксимації тощо.

У зв'язку з цим постає задача розроблення методу апроксимації математичної моделі печі на основі використання методу розділення змінних [56], який спрощує обчислювальні процедури та дозволяє оцінити похибку апроксимації.

4.3. Дослідження валідності спрощеної моделі процесу графітування

Спрощену математичну модель будуватимемо для двох режимів: нагріву та охолодження.

Режим нагріву

Для формування спрощеної математичної моделі згідно з методу розділення змінних (метод Фур'є) взято початкову матриця, що містила інформацію про температуру в усіх просторових точках печі графітування. Просторовий розподіл температур на момент часу графітування $t=60$ год. показаний на рис. 4.3.1.

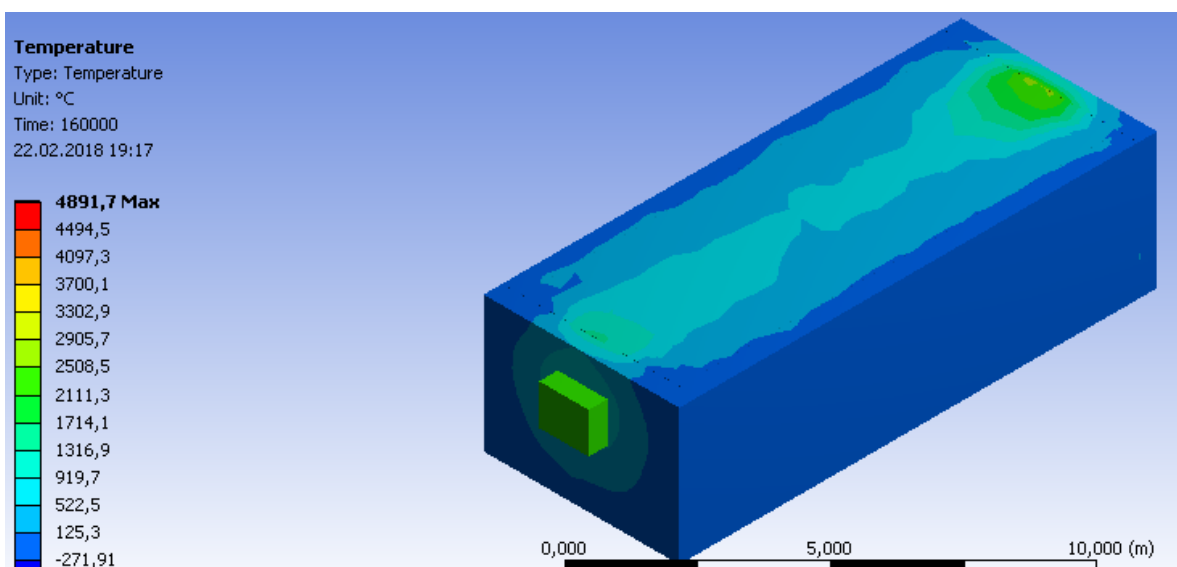


Рис 4.3.1– Температурне поле печі графітування на кінець кампанії

Для побудови спрощеної математичної моделі процесу графітування потрібно визначити базис-вектори (далі БВ) ψ_i та коефіцієнти Фур'є $a_i(t)$. БВ ψ_i визначаються за допомогою розкладу за сингулярними числами, а коефіцієнти Фур'є $a_i(t)$ з рівняння:

$$A = [a(1) \ a(2) \ \dots \ a(K)] = \Phi^T T,$$

де Φ – матриця, що складається з базис-векторів. Значення останніх наведені у табл. 4.3.1, а значення коефіцієнтів Фур'є у табл. 4.3.2.

Таблиця 4.3.1. Значення базис-векторів для створення спрощеної моделі режиму нагріву

$\xi \backslash i$	1	2	3		K
	- 0,00018516	- 0,00048982	- 4,772e-05		- 6,548950380651e-05
	- 0,00020837	- 0,00066610	0,000 79395		0,000149233685 502
	- 0,00018931	- 0,00054887	- 0,0002591		6,591084517447 e-05
	4,7388 6e-05	2,6809 7e-05	- 0,0014808		4,299037450466 e-05
	- 0,00016730	- 0,00044231	- 0,0005682		- 1,285334100109e-05

	- 0,0036386	0,0018 20	- 0,0014692		- 0,003533719461290

Таблиця 4.3.2. Значення коефіцієнтів $\alpha_i(t)$ для створення спрощеної моделі режиму нагріву

$t \backslash i$	1	2	3	4	...	K

	-	-	-	-	...	-
	30307,23	48577,08	64620,33	30307,23		351904,5
	-	-	-	-	...	24650
	37599,23	38119,28	40408,47	37599,23		,70

Продовження таблиці 4.3.2

	-	-	-	-	...	-
	18179,85	7527,770	5160,009	18179,85		5069,926
	5781,	-	-	5781,	...	-
	871	3003,682	2289,833	871		2177,364

	3,656	-	-	0,002	...	0,0205
	e-05	0,000113	0,000601	588		51851

Для формування математичної моделі, яка зв'язує керування з коефіцієнтами Фур'є $a_i(t)$, скористаємось моделлю авто регресії ковзного середнього:

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_{na} y(t-na) \\ = b_1 u(t-nk) + \dots + b_{nb} u(t-nb-nk+1) + e(t),$$

коефіцієнти якої $a_1 \dots a_{na}$ обчислюються у результаті параметричної ідентифікації.

Структура спрощеної моделі, що розробляється, залежить від таких її параметрів, як na , nb , nk – це матриці коефіцієнтів (na – кількість полюсів ідентифікуємої моделі, nb – кількість нулів плюс один, а nk – запізнення). Тому виникає потреба у проведенні дослідження, завдяки якому можна буде з'ясувати яка саме структура моделі є кращою. При цьому якість моделі будемо оцінювати за середньоквадратичною похибкою апроксимації.

Провівши ряд досліджень, були виявлені наступні оптимальні структури ідентифікаційних моделей у яких була найменша середньоквадратична похибка апроксимації значень, отриманих з початкової математичної моделі, ці значення наведені у табл. 4.3.3.

Таблиця 4.3.3. Дані про оптимальні структури ідентифікаційних моделей(нагрів)

n	na	nb	nk	Точність моделі, %
1	2	3	2	23,6088
2	4	4	4	0,0241
3	4	4	4	0,0046
4	4	4	4	0,0036

Дослідження для режиму охолодження було проведено за умов, наведених вище, аналогічних режиму нагріву і було отримано наступні результати (табл. 4.3.4).

Таблиця 4.3.4. Значення базис-векторів для створення спрощеної моделі режиму охолодження

$i \backslash \xi$	1	2	3		K
	- 0,001398272 63110693	- 0,053132995 1435510	0,061 670106007 9978		- 6,548950380651e-05
	- 0,001487452 41956618	- 0,047970909 8050220	0,040 056796973 9529		0,000149233685 502
	- 0,002211519	- 0,030751496	0,015 840886193		6,591084517447 e-05

	68997808	3142619	2928		
	-	-	0,021		4,299037450466
	0,002179035	0,032892437	507729047		e-05
	44516524	1144916	4789		

Продовження таблиці 4.3.4

	-	-	0,048		-1,285334100
	0,001690883	0,044516607	210736892		9929838630e-04109e-
	30761693	1853493	0800		05

	-	-	-		0,006377853054
	0,003931726	0,002009309	0,00076482		96296
	37361682	82742384	770257594		
			3		

Таблиця 4.3.5. Значення коефіцієнтів $\alpha_i(t)$ для створення спрощеної моделі

t	1	2	3	4		K
	-	-	-	-		-
	674160,26300	667675,45702	661190,55633	654705,70911		502336,51290
	7222	5694	7574	0463		7918
	-	-	-	-		9338,12
	13208,319789	11980,755278	10753,165714	9525,6028043		010382743
	9762	3904	6325	8375		
	-	-	-	-		-
	1021,0697234	818,98354443	616,98282780	415,01778578		920,82771024
	4442	4396	2435	9251		0234
	152,022	108,187	64,4196	20,5638		-

	954069354	627540784	949592484	065951257		348,86108980

	0,47455 6487011530	0,71862 2383832354	- 0,5965037705 72813	0,77623 0794168448		- 0,119542322875 848

Таблиця 4.3.6. Дані про оптимальні структури ідентифікаційних моделей(охолодження)

n	na	nb	nk	Точність моделі, %
1	3	4	4	766,7446
2	4	4	4	6,0677
3	1	4	4	1,1431
4	1	3	4	0,7762

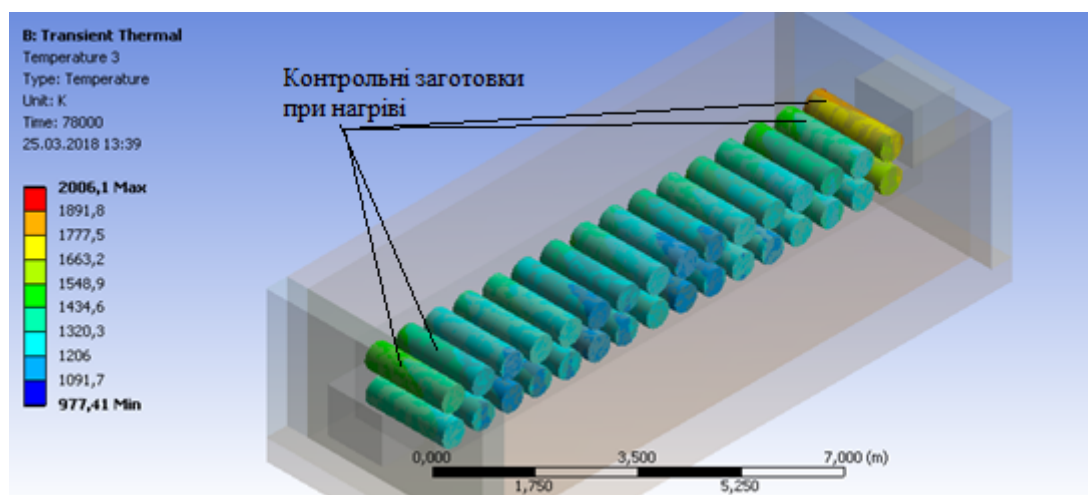
Точність моделі у відсотках, наведена у табл.3, 6, розраховувалась за формулою

$$100(1 - |T - \hat{T}|)/T.$$

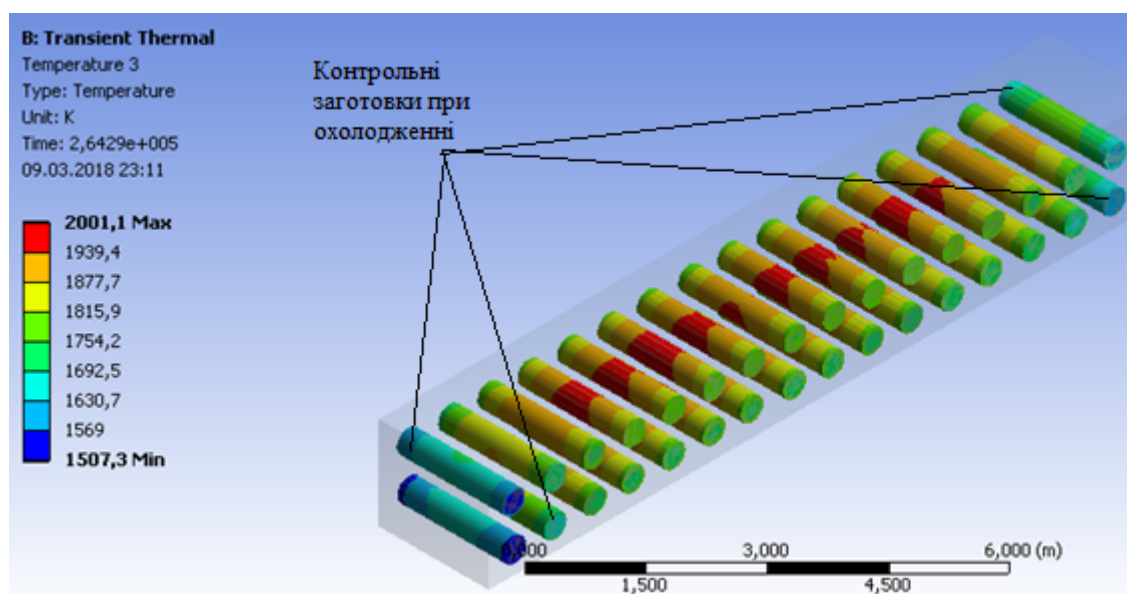
Час розрахунку отриманих спрощених математичних моделей різних структур практично наближається до нуля, що задовольняє поставлений у дослідженні запит. Тепер потрібно дослідити їх відповідність складній математичній моделі щодо їх точності.

Провівши ряд досліджень, були виявлені оптимальні структури ідентифікаційних моделей у яких була найменша середньоквадратична похибка апроксимації значень, отриманих з початкової математичної моделі (рис. 4.3.3, 4.3.4).

Характерними є найгарячіші та найхолодніші заготовки, тобто ті, які знаходяться біля торців печі на периферії у верхньому ряду та по торцям і у нижньому ряду відповідно (рис. 4.3.2).



а)



б)

Рис. 4.3.2 – Зображення розміщення характерних заготовок:
 а) під час режиму нагріву; б) під час режиму охолодження

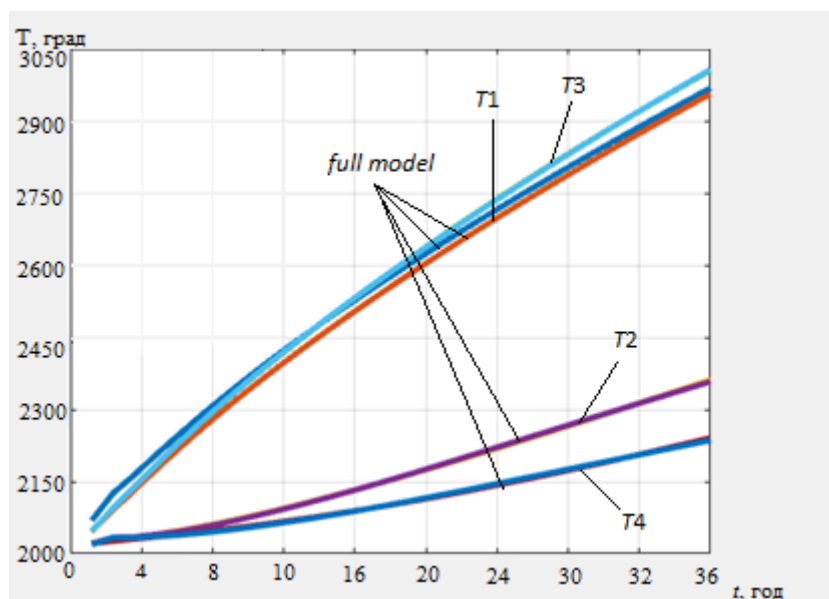


Рис. 4.3.3 – Графік значень температури кампанії графітування при нагріві, отримані з математичної (*full model*) та спрощеної математичної моделей 4-го порядку у характерних точках (T_1 , T_2 , T_3 , T_4)

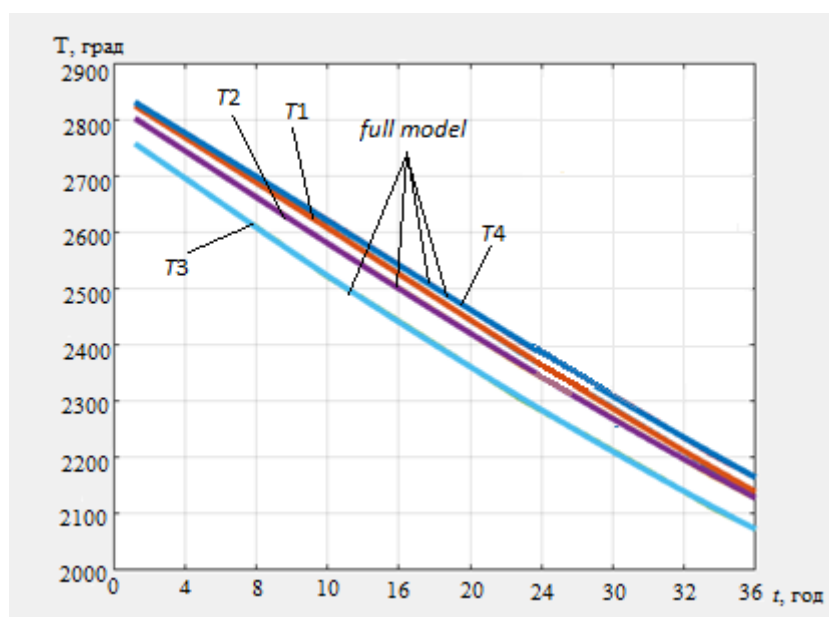


Рис. 4.3.4 – Графік значень температури кампанії графітування при охолодженні, отримані з математичної (*full model*) та спрощеної математичної моделей 4-го порядку у характерних точках (T_1 , T_2 , T_3 , T_4)

Середньоквадратичні похибки апроксимації для спрощених моделей різних структур представлені у табл. 4.3.7, 4.3.8.

Таблиця 4.3.7. Середньоквадратична похибка апроксимації для спрощених моделей різних структур (нагрів)

n	1	2	3	4
Похибка	766	3,552	0,5	0,1

Таблиця 4.3.8. Середньоквадратична похибка апроксимації для спрощених моделей різних структур (нагрів)

n	1	2	3	4
Похибка	766,747	6,067	1,143	0,776

Тобто, для режиму нагріву, як і для режиму охолодження найбільш близькою до математичної моделі є спрощена 4-го порядку. Це означає, що у подальших дослідженнях як спрощену математичну модель процесу графітування вуглецевих виробів будемо використовувати вище наведену структуру, яка задовольняє вимогам точності апроксимації.

5. Синтез системи керування процесом графітування вуглецевих виробів

5.1. Аналіз існуючих систем керування процесом графітування вуглецевих заготовок

Непродуктивні витрати теплоти у процесі графітування вуглецевих виробів тим менші, чим швидше відбувається розігрів керна печі (більша частка енергії витрачається на нагрівання виробів) [31]. Усі відомі способи керування піччю графітування у тій чи іншій формі реалізують ідею прискореного підведення потужності (а, отже, і розігріву керна печі) при гарантованому забезпеченні цілісності виробів.

Керування процесом здійснюють за заздалегідь розробленим регламентом, що включає початкову потужність печі, графік погодинного нарощування потужності та питомі витрати енергії для визначення моменту припинення кампанії графітування. Додатково практикують вимірювання температури периферії керна для уточнення моменту припинення кампанії графітування.

Регламент графітування вуглецевої продукції кожного типу розробляють експериментально на основі тривалої практики або розраховують приблизно за допомогою математичної моделі температурного поля для кожної окремої конструкції печі графітування. При цьому береться до уваги той факт, що скорочення тривалості кампанії означає зменшення тепловтрат та підвищення ефективності процесу графітування, але пришвидшення розігріву керна збільшує нерівномірність температурного поля в об'ємі заготовок, що збільшує термонапруження [20].

Швидкість розігріву обмежують так, щоб за відсутності достовірної інформації про температурний стан керна, унеможливити руйнування виробів (внаслідок термонапружень) при будь-яких збурювальних впливах. Тому спосіб часто призводить до значних перевитратам електроенергії, а при змушених простоях відсутні надійні рекомендації щодо продовження процесу.

Керування процесом графітизації шляхом зміни напруги печі в залежності від кількості підведеної енергії можна доповнювати зміною режиму охолодження

футеровки - керування за температурою футеровки. Для цього необхідно організувати визначення температури футеровки впродовж кампанії [57].

У праці [58] запропоновано швидко нагрівати kern до досягнення температури в області футеровки $800 \dots 1000^{\circ}\text{C}$ (що відповідає межі термостійкості матеріалу футеровки), а потім примусовим охолодженням запобігати розігріву футеровки до небезпечних температур. При цьому заготовки розігріваються до більш високих температур (на межі керна з теплоізоляцією температура може сягати $2800 \dots 3000^{\circ}\text{C}$), що сприяє підвищенню якості кінцевої продукції. Використання додаткового керування, на думку автора, дозволить скоротити тривалість кампанії та час охолодження печі, а також істотно зменшити витрати теплоізоляційної шихти.

Цей спосіб не має широкого вжитку, оскільки на великовантажних печах максимум теплового навантаження на футеровку печі графітизації припадає на час після припинення підведення потужності [59]. Крім того, в таких печах повітряне охолодження практично не впливає на розподіл енергії в керні, а інтенсивність охолодження футеровки, при під'єднанні системи охолодження до витяжної магістралі збільшується тільки на 1,45 %. Головним недоліком способу є висока ймовірність руйнування заготовок внаслідок термонапружень, що виникають при швидкому неконтрольованому розігріві керна.

В промисловій практиці охолодження вмикають на початку кампанії графітування і вимикають після охолодження печі.

Більш точний метод ведення процесу графітування та його припинення засновано на безпосередньому вимірюванні температури керна печі (керування за досягнутою температурою керна).

У роботі [20] запропоновано змінювати швидкість підведення потужності по зонам, що характеризуються рівнем досягнутих температур. Процес графітування розділяють на зони: до 1000°C , $1000 \dots 2000^{\circ}\text{C}$ та вище 2000°C , причому в другій зоні швидкість розігріву доцільно зменшувати. Конкретні рекомендації щодо швидкості розігріву визначаються експериментально для кожного типу продукції.

Для розробки раціонального регламенту підведення потужності запропоновано [60] як критерій, що визначає швидкість підведення енергії, використовувати відносний градієнт температур по радіусу заготовки. При цьому припустимий перепад температури, як функцію температури, визначено шляхом моделювання експериментальної кампанії графітування електродних заготовок того ж діаметру.

Реалізація даного способу потребує використання адекватної моделі температурного поля печі графітування, що здатна працювати в реальному часі. При цьому критичні значення температурних градієнтів визначаються експериментально для кожного типу продукції. Тому спосіб використовують тільки для корекції існуючих або розробки перспективних регламентів графітування.

Спосіб керування за сигналами акустичної емісії базується на аналізі акустичних сигналів, що їх емітує електродна заготовка в термонапруженому стані при виникненні та розвиткові дефектів структури. З праці [6] відомо, що при досягненні радіального перепаду температур в заготовках рівню, який відповідає границі міцності матеріалу, амплітуда акустичної емісії однозначно відображує утворення тріщин в об'ємі заготовки.

Цей спосіб не застосовують в промисловій практиці, оскільки дотепер не існує методу надійної дешифрування сигналів акустичної емісії до моменту розриву суцільності тіла виробу, крім того, заготовки в печі Ачесона мають різний рівень напруженості а контролювати акустичні сигнали кожної з них практично неможливо.

У праці [61] запропонований алгоритм керування процесом графітування та закінчення кампанії за величиною ступеня графітування у характерній точці простору печі. Дана величина розраховується за математичною моделлю, яка являє собою систему диференціальних рівнянь у частинних похідних. Розв'язок такої системи потребує значного часу навіть для сучасних обчислювальних засобів. Ця обставина суттєво обмежує застосування даного методу у системах керування реального часу. Крім того, визначення розташування характерної точки є суб'єктивним, що може позначитися на кінцевих результатах графітування.

5.2. Алгоритм керування процесом графітування вуглецевих виробів

У статті [62] показано, що, враховуючи ту обставину, що процес графітування є завершальним у виробництві вуглецевих виробів, то як критерії економічної ефективності функціонування даного процесу доцільно вибрати прибуток від реалізації готової продукції.

Як відомо [63, 64], даний показник має дві складові – продажну вартість та економічні витрати виробництва. Перша складова залежить від ринкової ситуації і не пов'язана з технологічним процесом графітування безпосередньо.

Для збільшення прибутку треба зменшувати другу складову – затрати на виробництво.

Як свідчать експериментальні дослідження [65, 66], які підтверджуються даними літературних джерел [20, 31, 66, 67], найбільш ефективним способом зменшення витрат на процес графітування є скорочення кампанії графітування шляхом її інтенсифікації [20, 31, 66 – 68]. При інтенсивному розігріванні заготовок, що графітуються, зменшуються втрати в оточуюче середовище і відповідно збільшується доля акумульованої теплоти, що йде на графітування.

Зменшення непродуктивних витрат акумульованої енергії, тобто витрат, які фактично потрібні для утворення графітованих виробів заданої якості, також скорочує тривалість кампанії графітування.

З урахуванням наведеного вище можна стверджувати, що мінімізація тривалості кампанії графітування при умові забезпечення заданих показників якості графітованих виробів одночасно забезпечить максимізацію прибутку виробництва.

Інтегральним показником якості графітованих виробів є ступінь графітування. Отже, задача оптимального керування процесом графітування вуглецевих виробів

формулюється таким чином: за рахунок інтенсифікації процесу досягти його мінімальної тривалості при умові забезпечення заданого ступеня графітування готової продукції.

Пропонується наступний алгоритм керування, схема алгоритм якого показана на рисунку.

Блок 1 формує початкові дані. До них відносяться: стартові струм та напруга печі графітування $I(0)$ та $U(0)$ відповідно (задається технологічним регламентом), початкові значення температур $T(0)$ у характерних точках в режимі нагрівання (фактично температура оточуючого середовища), початкова величина ступеня графітування $\beta=0$, початкове значення кроку розрахунку (дискретного часу) $k=0$.

У сучасних умовах доволі часто відбувається непередбачуване відключення електричного живлення печі графітування. Тому перевіряють чи працює піч у штатному режимі (блок 2 – «Ні»), тобто коли електричне живлення подається.

У штатному режимі роботи печі весь процес графітування можна умовно поділити на 2 етапи – нагрівання та охолодження. Після включення печі у роботу у штатному режимі у блоці 3 за допомогою математичної моделі нагрівання розраховують температуру у характерних точках у наступний момент часу $k+1$. До характерних точок відносяться точки всередині заготовки, які розташовані: у торці печі та верхньому ряді периферії на кінці та по центру заготовки (точки з максимальним перепадом температур), у торці печі та нижньому ряді периферії (точки з мінімальною температурою).

У блоці 4 перевіряють чи розпочався власне процес графітування (блок 4 – «Так») та розраховують ступінь графітування у блоці 5 за формулою:

$$\beta = e^{-B(T)\tau}.$$

Блоки 6 ... 12 призначені для розрахунку часу, що залишився до оптимального моменту закінчення процесу графітування $\Delta t_{\text{зуп.}}$. У блоці 6 виконуються потрібні переприсвоєння. Блок 7 за математичною моделлю охолодження розраховує температуру $T(m+1)$ у характерній точці режиму охолодження. Характерні точки для режиму охолодження це найхолодніші точки: у торцевих заготовках та на периферії нижнього ряду. У блоці 8 визначається ступінь графітування $\beta(m+1)$. Блок 9

перевіряє чи досягли потрібного ступеня графітування $\beta_{\text{зад}}$. Якщо так (блок 9 – «так»), то блоком 11 розраховується скільки часу $\Delta t_{\text{зуп}}$ залишилося до оптимальної зупинки процесу графітування за формулою

$$\Delta t_{\text{зуп}} = (m - k) \Delta \tau,$$

де $\Delta \tau$ – час дискретності розрахунків.

Виконання умови $\Delta t_{\text{зуп}} \leq 0$ (блок 12 – «Так») означає, що процес графітування закінчено і робота алгоритму зупиняється.

Далі для визначення максимально допустимої потужності, що подається на піч, блоком 13 перевіряється умова, чи не перевищує максимальний перепад температур у характерній заготовці допустимі межі. Якщо перепад температур допустимий (блок 13 – «Так»), перевіряється чи досягнуто з точки зору безпеки ведення процесу графітування максимально допустимого значення струму I_{max} . Якщо це значення не перевищене (блок 14 – «Ні»), збільшується напруга на наперед задану величину ΔU (блок 15) і здійснюється перехід до блоку 3.

Якщо розрахований перепад температур у характерній заготовці перевищує допустиме значення (блок 13 – «Ні»), або електричний струм досяг свого максимально допустимого значення (блок 14 – «Так»), блоком 16 визначається зменшена на величину ΔU напруга, блок 17 виконує потрібні переприсвоєння і з переходом до блоку 2 починається новий цикл роботи алгоритму.

Коли має місце аварійне відключення електроживлення печі (блок 2 – «Так») і цей період перевищує 20 хвилин, починається режим охолодження [1]. У цьому режимі у блоці 18 на основі математичної моделі охолодження розраховують температуру заготовок $T(k+1)$ у характерній точці. На етапі охолодження характерні точки розташовані на поверхні заготовок, які охолоджуються найшвидше (по торцям печі та нижній ряд периферії) та мають найбільший перепад температур (центральні заготовки верхнього ряду).

Якщо температура найбільш холодних заготовок перевищує 2000 °С, це означає, що процес графітування продовжується (блок 19 – «Так»), якщо ні, то здійснюють перехід до блоку 17. У разі, коли процес графітування після аварійного відключення електроживлення (блок 19 – «Так») продовжується, визначають

поточний ступінь графітування (блок 20), перевіряють чи розраховане значення відповідає заданому (блок 21). Якщо досягнуто потрібного ступеня графітування $\beta_{\text{зад}}$ (блок 21 – «Так»), то відновлення електроживлення не потрібно і робота алгоритму закінчується.

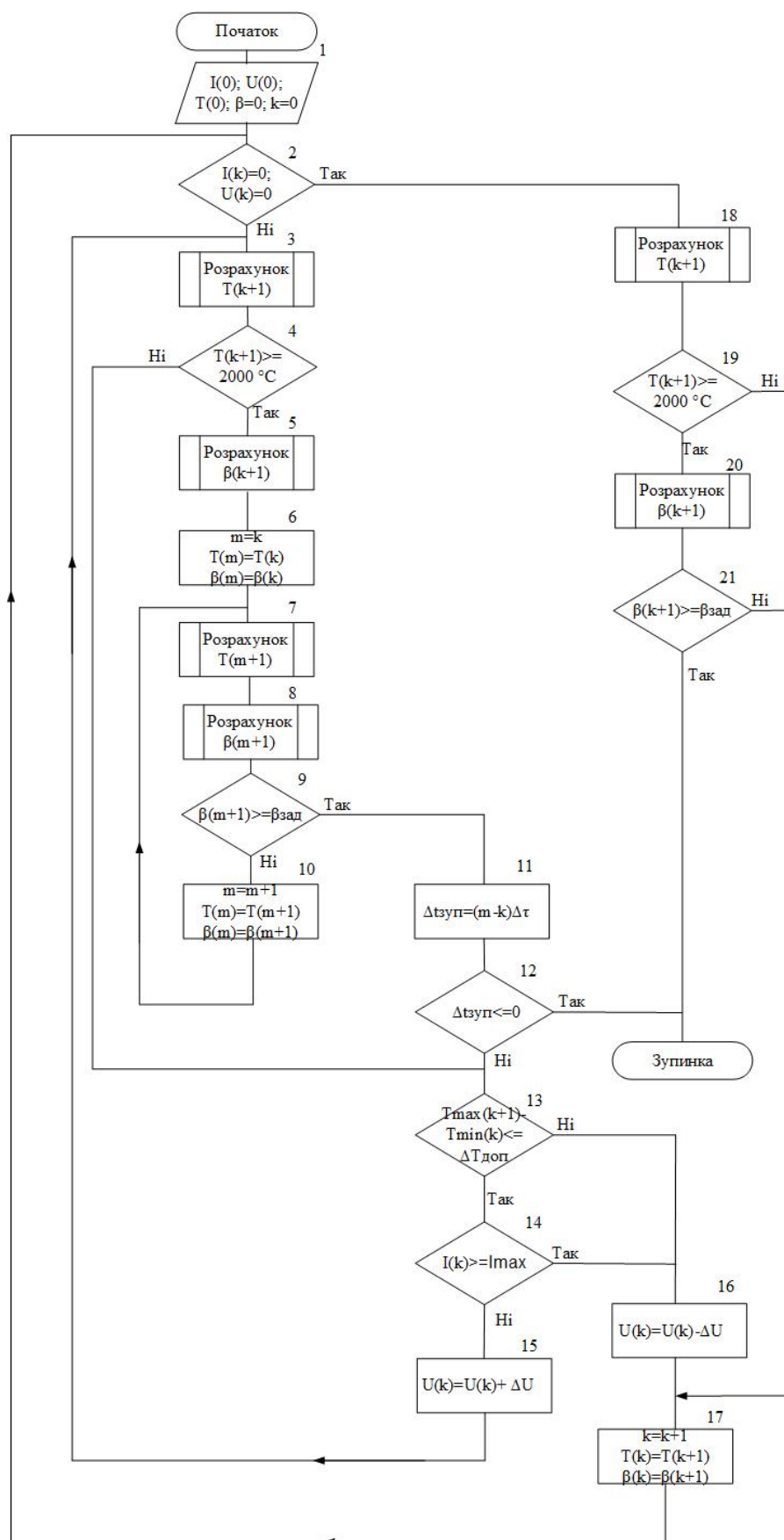


Рис. 5.2.1 – Структурна схема алгоритму керування процесом графітування

Якщо температура заготовок у характерній точці стала меншою за температуру початку графітування (блок 19 – «Ні»), то здійснюється перехід до блоку 17, в якому виконується підготовка до наступного кроку розрахунків.

6. Старт-проект

6.1. Опис ідеї стартап-проекту

Спосіб графітування вуглецевих виробів

1. Спосіб графітування вуглецевих виробів, при якому прогнозується момент припинення подачі живлення для забезпечення потрібного ступеня графітування.

2. Спосіб графітування вуглецевих виробів з прогнозуванням моменту припинення подачі живлення. Спосіб реалізують наступним чином. До електричної печі, у яку завантажують вуглецеві електроди, підводять струм. Тоді опосередковано через пересипку нагрівають заготовки і витримують їх при температурі графітування до набуття ними заданого ступеня графітування. У процесі графітування при певній температурі, за умови що вона буде сталою, розраховують час, потрібний для набуття виробів заданого значення ступеня графітування. За суттєвої зміни температури проводять новий розрахунок з урахуванням набутого виробами ступеня графітування. Таким чином, визначають прогнозований момент часу відключення живлення. Для розуміння суттєвої зміни температури використовують експериментальний графік залежності ступеня графітування від різних значень температури графітування. Використання розрахунків в реальному часі дозволить спрогнозувати момент припинення подачі електроенергії. Пропонований спосіб забезпечить бажаний ступінь графітування вуглецевих виробів та економію енергоресурсів.

3. *Конкурентами* є інші науковці-інженери, технологи, що займаються проблемою надзвичайної енергоємності процесу графітування вуглецевих електродів.

Основна конкурентна перевага: вдосконалення способу графітування вуглецевих виробів шляхом прогнозування моменту відключення подачі

електроенергії для потрібного ступеня графітування що зменшить витрати на енергоресурси.

Цільова аудиторія: завод з виробництва вуглецевих електродів ПАТ «Укрграфіт».

4. *Гроші:* для докупівлі обладнання та інтегрування програм контролю необхідно близько 10 тис. грн.

5. *Джерела грошей:* ПАТ «Укрграфіт», що зацікавлений у зменшенні енергоємності процесу графітування вуглецевих електродів

6. *Проблема процесу*

Виробництво графіту є дуже енергоємним. З [1] відомо, що питома кількість електроенергії, підведеної до печі Ачесона за період кампанії графітування, становить близько 6500 кВт·год/т. Тому зменшення витрат на кампанію графітування у сучасних економічних умовах є важливою науково-практичною задачею.

Особлива увага при виробництві електродних виробів з підвищеними експлуатаційними характеристиками приділяється забезпеченню однорідності їх фізичних властивостей.

На процес графітування впливає цілий ряд факторів, зокрема, індивідуальні властивості вуглецевих матеріалів, газове середовище, передісторія термічної обробки, тривалість процесу, температура тощо. Вплив декотрих із них на процес графітування наразі до кінця не досліджений. Однак, як показують численні дослідження [2 – 5], головним чинником, який визначає якість графітування вуглецевої речовини є кінцева температура. Причому для отримання якісного штучного графіту кінцева температура обробки повинна бути не нижче 2000 – 3000°C.

Графітування вуглецевих виробів, до яких відносяться електроди дугових сталеплавильних печей, подові блоки алюмінієвих електролізерів тощо, як правило, здійснюється в електричних печах опору по технології Ачесона [6]. Печі Ачесона характеризуються істотною нерівномірністю розподілу температурного

поля та нестабільністю електро- та теплофізичних властивостей матеріалів завантаження. При швидкому нагріванні печі збільшується нерівномірність температурного поля і, як наслідок, зростає термонапруження у виробках, що може призвести до браку продукції. У виробничих умовах з метою запобігання випуску бракованої продукції здійснюється опосередковане оцінювання термопружного стану виробів, що призводить до перевитрат електроенергії, а значить, до зниження ефективності виробництва.

Ще одним чинником перевитрат енергоресурсів є неточне визначення тривалості кампанії графітування, яка для гарантованого забезпечення нормативної якості готової продукції триває довше, ніж потрібно.

З метою підвищення ефективності процесу графітування вуглецевих виробів необхідне впровадження сучасної системи оптимального керування ним на основі аналізу поточного стану технологічного процесу.

Названі вище обставини викликають необхідність дослідження технологічного процесу, а саме температурних режимів що мають місце під час графітування вуглецевих виробів.

Використані джерела:

1. Жученко А. І. Керування процесом графітації при виробництві електродної продукції [Текст] : монографія./ А. І. Жученко, М. В. Коржик, С. В. Кутузов. – К.: НТУУ «КПІ», Вид. дім «Києво-Могилянська академія», 2013. – С. 13 – 15, 116 – 118. – іл. – Бібліогр.: 201–217. – 300 прим. – ISBN 978-966-518-634-2.
2. Лутков А. И. Тепловые и электрические свойства углеродных материалов / А. И. Лутков. – М. : Металлургия, 1990. – 175 с.
3. Franklin R. E. The structure of graphitic carbons / R. E. Franklin, // Acta Crystallographica. – 1951. Vol.4. – P. 253 – 261.
4. Чичулин Н. И. Исследование режимов нагревания электродных заготовок при графитации / Н. И. Чичулин, В. П. Соседов, Е. Ф. Чалых //

Совершенствование технологии и улучшение качества электродной продукции : сб. научн. тр., Вып.6. – Челябинск : ГосНИИЭП., 1974. – С. 128 – 134.

5. Соседов В. П. О рациональном графике подъема мощности и температуры в процессе графитации / В. П. Соседов, В. Б. Сасс-Тисовский, А. С. Карманов // Цветные металлы. – 1967. – № 2. – С. 62 – 63.

6. Кузнецов Д. М. Процесс графитации углеродных материалов. Современные методы исследования [Текст] / Д. М. Кузнецов, В. П. Фокин. – Новочеркасск: ЮРГТУ. – 2001. – 132 с.

Система збуту вертикальна договірна з селективною стратегією збуту: (винахідники алгоритму керування процесом графітування вуглецевих виробів з прогнозуванням виставляємо свої умови). Канал збуту: виробник – споживач.

6.2. Аналіз зовнішнього маркетингового середовища

Аналіз факторів макромаркетингового середовища.

Таблиця 6.2.1 – Підсумкова таблиця факторів політико-правового середовища

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
рівень політичної та законодавчої стабільності	Сміливе впровадження ідей	Дуже довгий процес оформлення документів	Паралельно подавати документи на впровадження та домовлятися з керівництвом заводу
податкове законо-	Держава	Додатко	Можливість отримувати

давство	захищає та підтримує	ві витрати	кошти за впроваджену на заводі ідею
---------	----------------------	------------	-------------------------------------

Таблиця 6.2.2 – Підсумкова таблиця факторів економічного середовища

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
фаза економічного циклу країни піднесення	Є більша ймовірність швидшого впровадження	Швидко закінчиться цей етап ек. циклу	Зменшення енергоспоживання підприємства завжди буде актуальною задачею.
рівень інфляції: 102 (дуже високий)	Завод потребує саме таких впроваджень	Малі нарахування заводу за впровадження винахідникам	Домовлятися про ціну з можливим збільшенням.
рівень доходів та купівельної спроможності населення: низький	Завод потребує саме таких впроваджень	Малі нарахування заводу за впровадження винахідникам	Домовлятися про ціну з можливим збільшенням.

Таблиця 6.2.3 – Підсумкова таблиця факторів науково-технічного середовища

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
введення нових технологій	Забезпечення енергоефективності підприємства	Підприємство не згодиться платити потрібну платню	Впровадження ідеї, що приноситиме дохід в арифметичній прогресії з кожним місяцем тим вище, чим менше витрати підприємства.
підвищення продуктивності праці			
напрями концентрації технологічних зусиль			

Таблиця 6.2.4 – Підсумкова таблиця факторів природного середовища

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Екологія: у поганому стані	Наша ідея допоможе знизити енерговитрати	Підприємство не повністю застосує	Контроль за впровадженням і експлуатацією ідеї.
вартість енергоносіїв: висока			

Природні катастрофи	та під вищипі продукт продукт, зменшити кількість бракованої продукції.	ідею, що не принесе потрібного економічного ефекту	
---------------------	---	--	--

6.3. Загальний аналіз стартап-ідеї

SWOT-аналіз – дозволяє провести детальне вивчення зовнішнього й внутрішнього середовища. Результатом раціонального SWOT-аналізу, спрямованого на формування узагальненого інформаційного потенціалу, є ефективні рішення, що стосуються відповідної реакції (впливу) суб'єкта (слабкої, середньої й сильної) відповідно до сигналу (слабкому, середньому або сильному) зовнішнього середовища.

Таблиця 6.3.1 – SWOT-аналіз

<i>Сильні сторони</i>	<i>Слабкі сторони</i>
<ul style="list-style-type: none"> - антимонопольне регулювання - фаза економічного циклу країни піднесення - введення нових технологій - Екологія: у поганому стані - Доступна ціни - Висока конкурентоспроможність через інновації і надання ідеї вищим учбовим технічним закладом - сервісне обслуговування з 	<ul style="list-style-type: none"> - рівень політичної та законодавчої стабільності - рівень інфляції: 102 (дуже високий) - рівень безробіття: високий - Менталітет: жалкують грошей, з великою обережністю ставляться до інновацій

боку винахідників	
Можливості	Загрози
- Впровадження енергоефективної ідеї, яка підвищить продуктивність і зменшить кількість бракованої продукції необхідні підприємству у виробництві вуглецевих виробів	- Страх вносити інновацію у технологічний процес аби не зробити гірше - Отримання малої фінансової винагороди

Найоптимальніший шлях вирішення проблеми є – представлення підприємству фактів, що свідчать про необхідність зменшення енерговитрат та підвищення продуктивності процесу, розвіяння побоювань щодо непрацездатності ідеї та договір про виплату фінансової винагороди, що буде з часом тільки збільшуватися до певного встановленого рівня, на якому потім триматиметься.

Таблиця 6.3.1 – Визначення стратегії позиціонування

п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентно-спроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформулювати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
.	1. Невисока ціна 2. Цілодобовий режим технічної підтримки	Стратегія диференціації	1. Відносно невисока ціна 2. Цілодобовий режим технічної підтримки 3. Надання ідеї від вищого технічного усього закладу	1. Інноваційність 2. Цілодобовий режим технічної підтримки впровадження 3. Безпека

	3. Безпека 4. Зменшення енерговитрат підприємства			
--	--	--	--	--

Таблиця 6.3.2 – Концепція маркетингових комунікацій

/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
.	Ефективне спілкування з клієнтами, супровід їх від надання пропозиції займатися у нас до заключення Договору.	Спілкування: у соціальних мережах; електронною поштою; реклама; безпосередній контакт; телефон; Договори та письмові домовленості.	Енергозбереження, підвищення продуктивності, цілодобова тех. Підтримка, безпечно.	Представлення основних переваг, наголошення на інноваційності і сучасності обладнання, безпечності.	Демонстрація роботи впровадження наочно, представлення отриманих експериментальних даних для підтвердження

					ння дієздатност і ідеї, проведення та назначення переговорів , ділових зустрічей.
--	--	--	--	--	---

Висновки

В результаті літературного огляду за станом проблем математичного моделювання та синтезованих систем керування процесом графітування вуглецевих виробів в печах Ачесона виявлено, що в існуючих математичних моделях не враховуються такі важливі особливості процесу як залежність фізичних властивостей сипких матеріалів від тиску і їх вологовміст, масо- і теплообмін при випаровування і конденсації води, теплота хімічних реакцій, що відбуваються у керні тощо, а їх застосування обмежено областю. В якій виконувалася оцінка їх адекватності. У даній роботі розроблена і представлена математична модель, в якій враховується газифікація коксової пересипки, піроліз деревини, тепломасоперенос води в сипкому матеріалі, відновлення оксидів металів.

У даній роботі, зважаючи на складність математичної моделі процесу та досить тривалий час, що необхідний для її розрахунку, розв'язана задача побудови спрощеної математичної моделі процесу графітування вуглецевих виробів, яка

відрізняється від відомих моделей практично нульовим часом її розрахунку. Проведене дослідження альтернативних спрощених моделей дозволило вибрати модель оптимальної структури, яка по точності у достатній мірі наближена до початкової складної математичної моделі. Було обрано оптимальні структури спрощених моделей процесу графітування вуглецевих виробів: 4-го порядку як для режиму нагріву, так і для охолодження. Побудована спрощена математична модель надає можливість підвищити ефективність дослідження температурного режиму процесу графітування вуглецевих виробів за рахунок скорочення часу дослідження, визначати температури у будь-якій точці процесу, навіть там, де немає вимірювальних пристроїв. Дана модель може бути використана для синтезу системи керування процесом, а також у складі системи керування реального часу.

Проведено дослідження температурних режимів процесу графітування вуглецевих виробів: нагрівання і охолодження. Результати проведеного дослідження свідчать про те, що температурні поля процесу графітування вуглецевих виробів як у режимі нагрівання, так і у режимі охолодженні суттєво залежать від типу заготовок, що завантажуються у піч, а також від їх розташування. Ця обставина не дозволяє сформувати єдину програму ведення технологічного процесу і ставить задачу адаптації технологічного регламенту до виробничої ситуації, що утворилася. Особливої складності ця задача набуває тоді, коли мають місце непередбачувані відключення печі графітування від енергопостачання.

Враховуючи суттєву температурну розподіленість процесу графітування, визначені місця розташування заготовок з найбільшою та найменшою температурою як у режимі нагрівання, так і у режимі охолодження. Це дозволяє з більшою точністю визначити потрібну тривалість процесу графітування до досягнення виробами заданого ступеня графітування.

Як показали результати проведеного дослідження, місця розташування характерних заготовок практично не змінюються у залежності від типу завантаження печі.

Для запобігання порушення механічної міцності вуглецевих виробів у процесі графітування потрібно забезпечити такі режими роботи, які не призводять до

перевищення певного перепаду температур у заготовках. Проведене дослідження дозволило виявити місця розташування заготовок з найбільшими перепадами температур та динаміку останніх у процесі графітування.

У даній роботі проведено аналіз існуючих систем керування та розроблено алгоритм керування процесом графітування вуглецевих виробів, що забезпечить випуск готової продукції заданої якості при функціонуванні процесу графітування у режимі ресурсо- та енергозбереження з урахуванням можливих непередбачуваних відключень енергоживлення.

Список використаної літератури

1. *Жученко А. І.* Керування процесом графітації при виробництві електродної продукції [Текст] : монографія./ А. І. Жученко, М. В. Коржик, С. В. Кутузов. – К.: НТУУ «КПІ», Вид. дім «Києво-Могилянська академія», 2013. – С. 13 – 15, 116 – 118. – іл. – Бібліогр.: 201–217. – 300 прим. – ISBN 978-966-518-634-2.
2. *Лутков А. И.* Тепловые и электрические свойства углеродных материалов / А. И. Лутков. – М. : Металлургия, 1990. – 175 с.
3. *Franklin R. E.* The structure of graphitic carbons / R. E. Franklin, // Acta Crystallographica. – 1951. Vol.4. – P. 253 – 261.
4. *Чичулин Н. И.* Исследование режимов нагревания электродных заготовок при графитации / Н. И. Чичулин, В. П. Соседов, Е. Ф. Чалых // Совершенствование технологии и улучшение качества электродной продукции : сб. научн. тр., Вып.6. – Челябинск : ГосНИИЭП., 1974. – С. 128 – 134.

5. *Соседов В. П.* О рациональном графике подъема мощности и температуры в процессе графитации / В. П. Соседов, В. Б. Сасс-Тисовский, А. С. Карманов // Цветные металлы. – 1967. – № 2. – С. 62 – 63.
6. *Кузнецов Д. М.* Процесс графитации углеродных материалов. Современные методы исследования [Текст] / Д. М. Кузнецов, В. П. Фокин. – Новочеркасск: ЮРГТУ. – 2001. – 132 с.
7. *Чалых Е. Ф.* Оборудование электродных заводов : учеб. Пособие [для вузов] / Е. Ф. Чалых. – М. : Metallurgia, 1990. – 238 с.
8. *Банников Г. К.* Применение углеграфитовых изделий в промышленности / Г. К. Банников, Э. Э. Немировский. – М. : ЦБТИ, 1959. – 22с.
9. *Тарасевич М. Р.* Электрохимия углеродных материалов / М. Р. Тарасевич. – М. : Наука, 1984. – 248 с.
10. *Carlson A.* An extended tight-binding approach for modeling supramolecular interactions of carbon nanotubes : a thesis for the degree of master of science : University of Minnesota / Anthony Carlson. – Minnesota, 2006. – 183 p.
11. Графит как высокотемпературный материал / Сб. ст. ; Пер. с англ. – М. : Мир, 1964. – 424 с.
12. *Фиалков А. С.* Углерод, медслоевые соединения и композиты на его основе / А. С. Фиалков. – М. : Аспект Пресс, 1997. – 718 с.
13. *Карвацький А. Я.* Теоретичні та експериментальні дослідження теплоелектричного та механічного стану високотемпературних агрегатів [Текст] : моногр. / А. Я. Карвацький, Є. М. Панов, С. В. Кутузов та ін. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 352 с.: іл. – Бібліогр.: с. 328 – 347. – 300 пр. ISBN 978-966-622-489-0
14. *Zazula Jan M.* On Graphite Transformations at High Temperature and Pressure Induced by Absorption of the LHC Beam : LHC Project Note 78/97, CERN-SL/BT(TA), 1997.
15. Искусственный графит / [В. С. Островский, Ю. С. Виргильев, В. И. Костиков и др.]. – М. : Metallurgia, 1986. – 272 с.

16. *Капелянов В. Я.* Повышение качества самообжигающихся электродов ферросплавных печей: Черная металлургия. Сер. Ферросплавное производство / В. Я. Капелянов; Ин-т «Черметинформация». – 1990, Вып.1.
17. *Чалых Е. Ф.* Технология углеграфитовых материалов / Е. Ф. Чалых. – М. : Металлургиздат, 1963. – 304 с.
18. *Bacon G. E.* The interlayer spacing of graphite / G. E. Bacon // *Acta Crystallographica*. – 1951. Vol.4 (6). – P. 558 – 561.
19. *Шулепов С. В.* Физика углеграфитовых материалов [Текст]/ С. В. Шулепов. – М-во просвещения РСФСР. - Челябинск : ЧГПИ, 1968. - 342 с. : граф., табл. ; 22 см. – Библиогр.: с. 319-339 (844 назв.). УДК 661.672
20. *Чичулин Н. И.* О режимах графитации углеродных изделий / Н. И. Чичулин, Б. И. Давыдович // Совершенствование технологии и улучшение качества электродной продукции : сб. научн. тр., Вып.5. – Челябинск : ГОСНИИЭП., 1973. – С. 114 – 121.
21. *Чичулин Н. И.* Исследование режимов нагревания электродных заготовок при графитации / Н. И. Чичулин, В. П. Соседов, Е. Ф. Чалых // Совершенствование технологии и улучшение качества электродной продукции : сб. научн. тр., Вып.6. – Челябинск : ГосНИИЭП., 1974. – С. 128 – 134.
22. *Волынский Б. А.* Электрическое моделирование печей графитации электродов : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук / Б. А. Волынский. – М., 1949. – 24 с.
23. Результаты испытаний новых схем загрузки электродов и применений унифицированной теплоизоляционной шихты в графитировочных печах / [Б. М. Кузин, В. М. Белоусов, Г. Ф. Булатов и др.] // Вопросы графитации углеродистых материалов. – М., 1968, Ч. I. - С. 57 – 69.
24. *Перевезенцев В. П.* Совершенствование существующих и разработка новых технологий графитации углеродных материалов : автореф. дис. на соискание науч. степени докт. техн. наук : спец. 05.17.11 «Технология керамических, силикатных и тугоплавких неметаллических материалов» / В. П. Перевезенцев. – М., 199. – 75 с.

25. А.с. 1350110 СССР. Способ укладки электродных заготовок в печи графитации / В. Ю. Знамеровский, В. А. Коцюр, Д. М. Кузнецов (СССР). – Открытия. Изобретения ; опубл. 1987, Бюл. № 41.
26. Сычев В. А. Электротехническое оснащение передела графитации в производстве графитировочных электродов в СССР и за рубежом : [обзор. информ.] / В. А. Сычев, В. А. Розенберг, Я. В. Метелица // производство легких цветных металлов и электродной продукции. – М. : 1987, Вып. 1.
27. Веселовский В. С. Угольные и графитные конструкционные материалы / В. С. Веселовский. – М. : Наука, 1966. – 227 с.
28. Фиалков А. С. углеграфитовые материалы / А. С. Фиалков. – М. : Энергия. 1979. – 320 с.
29. Санников А. К. Производство электродной продукции [Текст]/ А. К. Санников, А. Б. Сомов, В. В. Ключников и др. – М.: Металлургия, 1985. – 129 с. – Библиогр.: 21 назв. – 1230 экз. УДК 621.3.035.2
30. Шулепов С.В. Физика углеграфитовых материалов / С.В. Шулепов. – М.: Металлургия, 1972. – 256 с.
31. Соседов В.П. Графитация углеродистых материалов / В.П. Соседов, Е.Ф. Чалых. – М. : Металлургия, 1987. – 176 с. – Библиогр.: 16 назв. – 1230 экз. УДК 669.784:666.764.4
32. Гордов А.Н. Основы пирометрии / А.Н. Гордов. – М. : Металлургия, 1971. – 448 с.
33. Данишевский С.К. Высокотемпературные термопары / С.К. Данишевский, Н.И. Сведе-Швец. – М. : Металлургия, 1977. – 232 с.
34. Первезенцев В.П. Совершенствование существующих и разработка новых технологий графитации углеродных материалов : автореф. дис. на соискание науч. степ. докт. техн. наук : спец. 05.17.11 / В.П. Первезенцев. – М., 1999. – 75 с.
35. Пат. 25052 Україна, МПК7 G01K 3/00, C01B 31/04. Спосіб визначення температури заготовок у високотемпературних печах / Є.М.Панов, С.В.Кутузов, В.В.Деркач [та інш.] ; заявл. 12.03.2007 ; опубл. 25.07.2007, Бюл. № 11.

36. Пат. 67404 Україна, МПК7 G05D 23/275, G08B 1/00. Пристрій для сигналізації рівня температури в печах графітації / Є.М.Панов, М.В.Коржик, І.Л.Шилович [та інш.] ; заявл. 15.09.2003 ; опубл. 15.06.2005, Бюл. № 9.
37. Пат. 23422 Україна, МПК7 C01B 31/04, G01K 3/00. Спосіб визначення середньої температури заготовок в печі графітації / Є.М.Панов, С.В.Кутузов, О.Ю.Уразлина [та інш.] ; заявл. 25.12.2006 ; опубл. 25.05.2007, Бюл. № 7.
38. Чалых Е. Ф. Технология углеграфитовых материалов / Е. Ф. Чалых. – М. : Metallurgizdat, 1963 – 304 с.
39. Методика моделирования тепловых полей печей графитации / А. М. Фридман, М. Г. Аветьян, Н. А. Михайлова [и др.] // Конструкционные материалы на основе углерода : тем. отр. сб. тр. – М. : Metallurgiya, 1978. – С. 6 – 11.
40. Arai Y. Simulation study of carbon graphizing surface / Y. Arai, T. Yokoyama, T. Shinohara [et al.] // Simulation of Distributed-Parameter and Large Scale Systems North-Holland Publishing Company. IMCS. – 1980.
41. Огнева М. Ф. Степень влияния градиента температур в заготовке на оптимизацию режимов графитации / М. Ф. Огнева, А. Д. Кокурин, В. Ю. Смирнова [и др.] // Производство углеродных материалов: сб. научн. тр. – М. : НИИГрафит, 1981. – С. 75 – 82.
42. Знамеровский В. Ю. Математическое моделирование процесса графитации / В. Ю. Знамеровский. – М. : Metallurgiya, 1994. – 64 с.
43. Знамеровский В. Ю. Математическое моделирование процессов теплообмена в электрических печах сопротивления при производстве электродного графита / В. Ю. Знамеровский, В. В. Яшкина // Промышленная энергетика. – 1984. – № 2. – С. 31 – 33.
44. Яшкина В. В. Математическая модель тепловой работы печи графитации / В. В. Яшкина, В. Ю. Знамеровский // Современные достижения в области исследования, производства и эксплуатации углеродных материалов и изделий : Всесоюзная конф. мол. учен. и спец. : тез. докл. и сообщ.. – Челябинск, 1984. – С. 50 – 51.

45. *Знамеровский В. Ю.* Особенности решения задач теплопроводности с внутренним источником теплоты / В. Ю. Знамеровский // Промышленная энергетика. – 1986. – №3. – С. 24 – 26.
46. *Шкуланов Е. Е.* Особенности моделирования температурных полей в печах графитации прямого нагрева / Е. Е. Шкуланов, Д. М. Кузнецов // Математические методы в технике и технологиях ММТТ-2000., С-Пб. – 2000. Т.3, секц. 3. – С. 198 – 199.
47. *Кузнецов Д. М.* Научные основы технологии графитации крупногабаритных электродов : автореф. дис. На соискание степени докт. техн. наук : спец. 05.17.07 «Химия и технология топлив и специальных продуктов» / Д. М. Кузнецов. – Новочеркасск., 2002. – 294 с.
48. *Кутузов С. В.* Підвищення ефективності роботи печей графітації електродних виробів : автореф. дис.. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.05.13 «Машини та апарати хімічних виробництв» / С. В. Кутузов. – К., 2007. – 22 с.
49. *Карвацкий А. Я.* Теплоэлектрический та механический стан високотемпературных энергоёмных промышленных агрегатов : автореф. Дис.. на здобуття наук. ступеня докт. Техн.. наук : спец. 05.05.13 «Машини та апарати хімічних виробництв» / А. Я. Карвацкий. – К., 2010. – 40 с.
50. *Лелека С. В.* Теплоэлектрическое состояние печей графитирования Ачесона : монографія / С. В. Лелека, Е. Н. Панов, А. Я. Карвацкий и др. – К.: НТУУ «КПИ», 2014. – 238 с.: ил. – Библиогр. : с. 226 – 236. – 240 экз. ISBN 978-966-622-597-2
51. *Simo J. C.* Consistent tangent operators for rate-independent elastoplasticity / J. C. Simo, R. L. Taylor // Comp. methods in applied mechanics and engineering. — 1985, Vol. 48. — P. 101—118.
52. *Шевяков А.А., Яковлева Р.В.* Управление тепловыми объектами с распределенными параметрами. – М.: Энергоатомиздат, 1986. - 208 с.
53. *Бутковский А.Г.* Теория оптимального управления системы с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1965. - 474 с.

54. Чермак И. Динамика регулируемых систем в теплоэнергетике и химии. / И. Чермак, В. Паперка, И. Заворка – М.: Мир, 1972. - 623 с.
55. Демиденко Н.Д. Управляемые распределенные системы. / Н. Д. Демиденко – Новосибирск.: Наука, 1999. - 392 с.
56. Жученко О. А. Метод спрощення математичних моделей об'єктів керування із розподіленими параметрами / О. А. Жученко, В. С. Цапар // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. - 2015. - Vol. 7, № 1. - С. 15 – 25. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/avtib_2015_7_1_6.
57. Самохин И.Н. Опыт эксплуатации печей с принудительным охлаждением стен и подины при повышенной плотности тока в керне для производства конструкционного графита / И.Н. Самохин, И.М. Розенман, В.Б. Сасс-Тисовский // Вопросы графитации углеродистых материалов : Сб. научн. тр. – Ч. 1. – М. : Цветметинформация, 1968. – С. 70–78.
58. Соседов В.П. Особенности электрического и теплового режимов печи графитации / В.П. Соседов // Конструкционные углеграфитовые материалы : Сб.научн. тр. – М. : Metallurgy, 1964. – Вып. 1. – С. 99–159.
59. Знамеровский В.Ю. Разработка математической модели печи графитации на стадии охлаждения / В.Ю. Знамеровский, А.Н. Бусов, М.В. Полухина [и др.] // Совершенствование технологии электродного производства : Сб. научн. тр. – М. : НИИГрафит, ГосНИИЭП, 1988. – С. 71–77.
60. Знамеровский В.Ю. Исследование режимов ввода энергии в печи графитации / В.Ю. Знамеровский, В.В. Яшкина // Промышленная энергетика. – 1985. – № 11. – С. 40–42.
61. Коржик М.В. Математичне моделювання та автоматизоване керування процесом графітації в печах Ачесона. дис. канд. техн. наук : 05.13.07 / Коржик Михайло Володимирович ; М-во освіти і науки України, НТУУ «КПІ». – Київ, 2010.
62. Zhuchenko O.A. Statement of the optimization problem of carbon products production / O.A. Zhuchenko // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів : Міжнар. наук.-вироб. журн. – 2016. – Vol. 8, Issue 2. – С. 39-44.

63. *Нефедов Ю. М.* Методы оптимизации: Учеб. пос. – Луганск: Изд. ВНУ им. В. Даля, 2004.
64. *Ярымбаш Д.С.* Анализ электромагнитных и термоэлектрических процессов в печах Ачесона / Д. С. Ярымбаш // Энергозбереження. Енергетика. Енергоаудит, Харків, 2014. №6 – С. 11 – 21.
65. *Таха Х.* Введение в исследование операций. – М.: Мир, 1985. – 479 с.
66. *Коржик М.В.* Модель температурного поля печі графітації / М.В. Коржик, С.В. Кутузов // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. – 2007. – № 1. – С. 17 – 23.
67. *Панов Е.Н.* Интенсификация процесса графитации электродных изделий в печах Ачесона постоянного тока / Е.Н. Панов, М.В. Коржик, А.Я. Карвацкий // Аллюминий Сибири – 2007 : XIII междун. конф., 11–13 сент. 2007. : доклады – Красноярск : Версо, 2007 г. – С. 331–337.
68. *Коржик М.В.* Розробка системи керування процесом графітації в печах Ачесона / М.В. Коржик, А.І. Гурчик // Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2010. – № 1. – С. 98–103.

